

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS EN MODELO HIDRÁULICO DE LA ESTRUCTURA DE
INTERCONEXIÓN DE LAS CENTRALES SARAPULLO Y
ALLURIQUÍN**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

LENIN RAFAEL MALDONADO NARVÁEZ

(leninmn88@hotmail.com)

DARÍO XAVIER PALLARES CASTRO

(darioxpc88@yahoo.com)

DIRECTOR: DR. ING. MARCO CASTRO DELGADO

(marco.castro@epn.edu.ec)

Quito, Enero 2012

DECLARACIÓN

Nosotros, Lenin Rafael Maldonado Narváez y Darío Xavier Pallares Castro declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

**LENIN RAFAEL MALDONADO
NARVÁEZ**

**DARÍO XAVIER PALLARES
CASTRO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Lenin Rafael Maldonado Narváez y Darío Xavier Pallares Castro, bajo mi supervisión.

DR. ING. MARCO CASTRO
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que conforman la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional, a todos los ingenieros que contribuyeron con su conocimientos y experiencia fueron la base fundamental para completar este periodo de formación profesional, de manera muy especial a los miembros de nuestro tribunal el Dr. Marco Castro, la Ing. Ximena Hidalgo y la Ing. Nathalia Valencia por el apoyo, confianza y sobretodo la amistad brindada. A mis padres que son el más grande ejemplo a seguir por su dedicación y perseverancia y a mi hermana Verónica por el cariño y apoyo incondicional. A mis amigos y compañeros por su lealtad y compañía. A Gaby por su apoyo y amor en cada momento. A Diego por apoyarme siempre y ser como un hermano.

A mi compañero de tesis Darío por el apoyo brindando, las enseñanzas pero sobretodo por la gran amistad.

A Patricio, Lucía, Pavlo, Cris y Pablo, con quienes se llegó a formar un excelente grupo de trabajo pero más aún porque han sido unos amigos incondicionales. A Elsy por el aporte brindado en este proyecto pero más aún por el cariño y amistad.

Lenin Maldonado Narvéez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios Nuestro Señor, por tener a mi lado a tan maravillosas personas como es mi padre Jorge, quien con su apoyo, confianza, fuerzas y cariño me ha hecho seguir adelante y llegar a ser la persona que soy, mi madre Alicia que ha caminado conmigo en los momentos de alegría y tristeza, que es la persona que siempre está conmigo en mi corazón, a mi hermana Grace por la comprensión que me ha brindado en esta etapa de mi vida que fue la universidad, a mi familia por el apoyo incondicional que siempre me ha brindado y el que anhelo me sigan ofreciendo, por darme la humildad y esa unidad que me ha servido de fortaleza para salir adelante ante cualquier adversidad.

A mi amigo y compañero de tesis Lenin por el respaldo que he encontrado en él, por las enseñanzas brindadas y por sobre todo su amistad. A mis amigos del alma, los mampuestos, Jonathan, Javier, Ricardo, Belén, Fausto, Carmen, Marco, Pavlo, Jaime, que me ayudaron a sobrellevar mi vida universitaria.

Agradezco a Elsa por el conocimiento que aportó en la realización de la tesis y por los consejos que nos ofreció, a nuestro tribunal Dr. Marco Castro, Ing. Ximena Hidalgo e Ing. Nathalia Valencia por la guía impartida y la sabiduría entregada desinteresadamente.

A Patricio, Lucía, Cris, Pablo por la amistad incondicional entregada, a todo el personal de la Politécnica que ayudó en la realización del modelo, sin dejar de lado el agradecimiento para el personal administrativo y docentes de la Gloriosa Carrera de Ingeniería Civil, facultad que me ha dejado muchas experiencias personales, un gran conocimiento y personas que llegaron a ocupar un lugar en mi corazón.

Gracias a todos por la consideración que tienen para con mi persona.

Muchas Gracias y que Dios les Bendiga.

Darío Pallares Castro

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico principalmente a mis padres Norma y Rafael, que con su esfuerzo y dedicación han sido el pilar fundamental para alcanzar esta meta en mi vida, a mi hermana Verónica, a todos mis amigos y compañeros los que han estado tanto en los momentos buenos como en los de dificultades.

Lenin Maldonado Narváez

DEDICATORIA

Dedico esta meta alcanzada a Dios, porque es Él quien me permite estar aquí compartiendo esta alegría, me da fuerzas para levantarme y seguir adelante cada día, y me da salud para seguir alcanzando las metas que tengo en mi vida.

Dedico este triunfo a mi hermosa hermana Grace, a mis padres Jorge y Alicia, que día a día han palpado el crecimiento personal que he tenido, que han soportado mis malos momentos y hemos sabido salir juntos ante cualquier adversidad.

Mi bella familia también es partícipe de este logro, es por eso que dedico este trabajo a mis abuelitos, mis tíos, mis primos y a mi ahijado.

De igual forma dedico a mis amigos incondicionales de la vida, Jonathan, Javier, Ricardo, Belén, Fausto, Carmen, Marco, Pavlo, Jaime, Lenin, Pato, Lucy, Cris y Pablo.

He conseguido una meta más pero me quedan otras por alcanzar, así que la vida sigue.

Darío Pallares Castro

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
AGRADECIMIENTOS	V
DEDICATORIA.....	VI
DEDICATORIA.....	VII
CONTENIDO.....	VIII
ÍNDICE DE CUADROS	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVI
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	XIX
ÍNDICE DE PLANOS.....	XXI
SIMBOLOGÍA.....	XXII
RESUMEN	XXIV
ABSTRACT	XXV
PRESENTACIÓN.....	XXVI
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS SARAPULLO Y ALLURIQUÍN	1
1.1.1 APROVECHAMIENTO PILATÓN-SARAPULLO	2
1.1.2 APROVECHAMIENTO TOACHI-ALLURIQUÍN.....	5
1.2 GENERALIDADES SOBRE LA OPERACIÓN CONJUNTA DE LOS DOS SISTEMAS EN SU DISEÑO ORIGINAL.....	11
1.3 SÍNTESIS DE LOS REQUERIMIENTOS PARA LA SIMULACIÓN EN MODELO FÍSICO DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN O DE INTERCONEXIÓN DE LAS DOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	12

1.4 ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES DE SOLUCIÓN: MODELACIÓN FÍSICA Y MODELACIÓN NUMÉRICA.....	12
1.5 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.....	13
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.5.3 ALCANCE	13
CAPÍTULO 2	14
CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL FLUJO EN EL INTERIOR DE UNA ESTRUCTURA DE UNIÓN	14
2.1 DEFINICIONES PARA EL ANÁLISIS DEL FLUJO A PRESIÓN (EN SECCIONES IRREGULARES Y COMPUESTAS): RELACIONES FUNCIONALES RESPECTO DE LA RESISTENCIA AL MOVIMIENTO Y PÉRDIDAS DE ENERGÍA.	14
2.1.1 CONSIDERACIONES GENERALES DEL FLUJO DE AGUA A PRESIÓN.....	16
2.1.2 PÉRDIDAS DE ENERGÍA.....	17
2.2 ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LOS FENÓMENOS DE SEPARACIÓN DE FLUJO, DE FORMACIÓN DE ZONAS DE REFLUJO, INTRODUCCIÓN DE AIRE Y DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN LA UNIÓN DE FLUJOS CON VELOCIDADES DIFERENTES.....	22
2.2.1 SEPARACIÓN DE FLUJO – CAPA LÍMITE	22
2.3 SÍNTESIS DEL FENÓMENO DE RESISTENCIA AL FLUJO EN ESTRUCTURAS DE UNIÓN DE FLUJOS CON CAUDALES DIFERENTES Y DE ALTAS VELOCIDADES.....	28
2.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO EN UNIONES	29
CAPÍTULO 3	30
SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL.....	30
3.1 ANÁLISIS DE LAS RELACIONES FUNCIONALES PROPUESTAS EN LA LITERATURA TÉCNICA.....	30

3.1.1 RELACIONES FUNCIONALES PARA EL CÁLCULO DE COEFICIENTES DE PÉRDIDA EN UNIONES DE FLUJOS SEGÚN D. S. MILLER.....	30
3.1.2 RELACIONES FUNCIONALES PARA EL CÁLCULO DE COEFICIENTES DE PÉRDIDA EN UNIONES DE FLUJOS SEGÚN I. E. IDELCHIK.....	33
3.2 SÍNTESIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES EN COMPARACIÓN CON LA GEOMETRÍA PROPUESTA PARA LA UNIÓN SARAPULLO – TOACHI.	37
3.2.1 EJEMPLO DE APLICACIÓN: COEFICIENTE DE PÉRDIDA DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO – TOACHI.	39
3.3 CONCLUSIONES.....	44
CAPÍTULO 4	45
ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FENÓMENO FÍSICO	45
4.1 INTRODUCCIÓN: BASES DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL PROBLEMA Y CRITERIO DE SIMILITUD DINÁMICA REQUERIDA.	45
4.1.1 SIMILITUD GEOMÉTRICA.....	46
4.1.2 SIMILITUD CINEMÁTICA.....	46
4.1.3 SIMILITUD DINÁMICA.....	47
4.2 RELACIÓN FUNCIONAL TEÓRICA Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES.....	48
4.3 RELACIÓN FUNCIONAL RESTRINGIDA Y FORMULACIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.	51
4.3.1 SIMILITUD DINÁMICA REQUERIDA.....	51
4.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
CAPÍTULO 5	54
DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO FÍSICO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN.....	54
5.1 DISEÑO DEL MODELO HIDRÁULICO FÍSICO: ESCALAS E IMPLANTACIÓN EN EL LABORATORIO.....	54
5.1.1 SELECCIÓN DE ESCALA.....	55

5.2 JUSTIFICACIÓN DE LA ESCALA DEL MODELO FÍSICO.....	56
5.2.1 CRITERIO DE SIMILITUD ADOPTADO PARA EL MODELO Y ESCALAS DE LAS DIFERENTES MAGNITUDES DERIVADAS EN LA INVESTIGACIÓN ($RE > 2 \times 10^4$)	56
5.2.2 DISPONIBILIDAD DE ESPACIO FÍSICO, CONDICIONES EN EL LABORATORIO	57
5.2.3 POSIBILIDAD DE ANALIZAR LA INTRODUCCIÓN DE AIRE	57
5.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO Y CHEQUEO DE LAS DIMENSIONES DE LAS ESTRUCTURAS, DE LAS INSTALACIONES Y DE LOS EQUIPOS A SER UTILIZADOS.	58
5.3.1 GENERALIDADES	58
5.3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO	60
5.3.3 MODELO DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO – TOACHI.	64
5.3.4 INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPAMIENTO.....	70
5.4 OBJETIVOS, ALCANCE Y PLAN DE PRUEBAS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO.	78
5.4.1 OBJETIVOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO	78
5.4.2 ALCANCE DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	78
5.4.3 PLAN DE PRUEBAS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO	79
5.5 CONCLUSIONES.....	89
CAPÍTULO 6	91
PLAN DE PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS CON EL DISEÑO ORIGINAL	91
6.1 PLAN DE PRUEBAS POR OBRAS O COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN.....	91
6.1.1 OBJETIVOS DE LA FASE DE PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL	91
6.1.2 PLAN DE PRUEBAS CON DISEÑO ORIGINAL	92
6.1.3 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN LAS PRUEBAS DEL MODELO FÍSICO CON DISEÑO ORIGINAL	93

6.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES RESPECTO DE LOS VALORES ESPERADOS.....	110
6.2.1 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN CON LOS VALORES PROPUESTOS POR D. MILLER.....	110
6.2.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN CON LOS VALORES PROPUESTOS POR I'DELCHIK.	112
6.2.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN (λ) OBTENIDOS EN EL MODELO CON LOS VALORES OBTENIDOS TEÓRICAMENTE.....	113
6.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS VALORES EXPERIMENTALES.	115
6.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	119
CAPÍTULO 7	121
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
7.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN O DE INTERCONEXIÓN.	121
7.2 CONCLUSIONES SOBRE EL USO DE MODELOS HIDRÁULICOS.....	125
7.3 RECOMENDACIONES.....	126
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
ANEXOS	128
ANEXO NO. 1	129
FOTOGRAFÍAS.....	129
CONSTRUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA Y DEL MODELO.....	130
FASE DE CALIBRACIÓN DEL MODELO	135
PRUEBAS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO	137
PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - TOACHI.....	141
PRUEBAS COMPLEMENTARIAS CON EL DISEÑO ORIGINAL DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO – TOACHI	150
ANEXO NO. 2	156

GRÁFICOS.....	156
FUNCIONALIDAD DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA CON EL NÚMERO REYNOLDS EN TUBERÍAS DE RUGOSIDAD UNIFORME DEL GRANO.....	157
COMPARACIÓN DE VALORES TEÓRICOS DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN.....	158
COMPARACIÓN DE VALORES TEÓRICOS DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN.....	159
COMPARACIÓN DE VALORES TEÓRICOS DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN.....	160
ANEXO NO. 3.....	161
REGISTRO DE DATOS.....	161
ANEXO NO. 4.....	177
PLANOS.....	177

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO No. 1.1: Características de las casas de maquinas del proyecto Toachi Pilatón.	10
CUADRO No. 3.1: Coeficientes de Pérdida k_{S-G} en función de la relación Q_T/Q_G para unión de conductos a 60° y 90° , a partir de los ábacos de D.S. Miller.	31
CUADRO No. 3.1: Continuación.	32
CUADRO No. 3.2: Coeficientes de Pérdida k_{T-G} en función de la relación Q_T/Q_G para unión de conductos a 60° y 90° , a partir de los ábacos de D.S. Miller.	32
CUADRO No. 3.2: Continuación.	33
CUADRO No. 3.3: Coeficientes de Pérdida k_{S-G} en función de la Relación Q_T/Q_G para una relación de áreas igual a 1, a partir de los ábacos de I. E. Idelchik.	35
CUADRO No. 3.4: Coeficientes de Pérdida k_{T-G} en función de la Relación Q_T/Q_G para una relación de áreas igual a 1, a partir de los ábacos de I. E. Idelchik.	36
CUADRO No. 3.5: Escenarios de Funcionamiento de la Estructura de Unión Sarapullo – Toachi.	38
CUADRO No. 3.6: Coeficientes de Pérdida k_{T-G} y k_{S-G} para unión de conductos a partir de las ecuaciones de I. E. Idelchik.	39
CUADRO No. 3.7: Valores de caudales del Escenario 1.	40
CUADRO No. 3.8: Valores de pérdida por fricción en los tramos Túnel de descarga Sarapullo y Galería de Interconexión.	40
CUADRO No. 3.9: Valores de pérdida localizada en base a literatura técnica: Estructura de Unión y Transición (Idelchik), Bocatoma (Bureau), Rejilla (Sotelo).	41
CUADRO No. 3.10: Niveles de energía en el tramo túnel de descarga Sarapullo - Galería de Interconexión.	41
CUADRO No. 3.11: Niveles de energía experimentales en el tramo: Bocatoma de la presa Toachi-final de Galería de Interconexión.	43
CUADRO No 4.1: Secciones prototipo y valores obtenidos de λ_p y n_p	49
CUADRO No 4.1: Continuación.	50
CUADRO No 4.2: Secciones de modelo y valores obtenidos de λ_m y n_m	50
CUADRO No 4.2: Continuación.	51
CUADRO No. 5.1: Planos de detalle para el dimensionamiento hidráulico de la Estructura de Unión Sarapullo – Toachi.	54

CUADRO No. 5.2: Análisis comparativo entre diferentes escalas para el modelo.	55
CUADRO No. 5.3: Características del modelo a escala 1:20.....	56
CUADRO No. 5.4: Dimensiones geométricas y variables hidrodinámicas del modelo.	58
CUADRO No. 5.5: Comparación de medidas de modelo Planteadas – Construidas.	78
CUADRO No. 5.5: Continuación.	79
CUADRO No. 5.6: Pruebas de calibración del vertedero rectangular – Túnel de Descarga Sarapullo.....	80
CUADRO No. 5.7: Pruebas de calibración del vertedero rectangular – Embalse Toachi.	81
CUADRO No. 5.8: Pruebas de calibración del vertedero triangular – Canal de Descarga del modelo.	81
CUADRO No. 5.9: Pruebas de calibración de modelo.	83
CUADRO No. 5.10: Variación del coeficiente “k” entre Túnel Sarapullo (piezómetro 1) y la salida de la Estructura de Unión (piezómetro 5) con respecto al número de Reynolds.	85
CUADRO No. 5.11: Variación del coeficiente “k” entre Embalse Presa Toachi (punto de medida 8) y la salida de la Estructura de Unión (piezómetro 5) en función del número de Reynolds.	86
CUADRO No. 5.12: Comparación entre los valores de λ_p y λ_m	87
CUADRO No. 6.1: Plan de pruebas con el diseño original.....	93
CUADRO No. 6.2: Caudales ensayados con Diseño original y su comparación con los valores esperados.	94
CUADRO No. 6.3: Grupos de análisis en función de la relación (Q_T/Q_G).....	101
CUADRO No. 6.4: Variación de k_{39} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 1, 3 y 4.	101
CUADRO No. 6.5: Variación de k_{49} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 1, 3 y 4.	102
CUADRO No. 6.6: Variación de k_{39} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 2 y 7.	103

CUADRO No. 6.7: Variación de k_{49} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 2 y 7.	103
CUADRO No. 6.8: Variación de k_{39} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 2 y 7.	104
CUADRO No. 6.9: Variación de k_{49} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 2 y 7.	104
CUADRO No. 6.10: Variación de k_{49} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 8 y 9.	106
CUADRO No. 6.11: Valores de λ_m para los escenarios de funcionamiento 1, 3, 4, 6, 7 y 8.	107
CUADRO No. 6.11: Continuación.	108
CUADRO No. 6.12: Comparación de λ teórico y experimental, Túnel de Descarga Sarapullo.	113
CUADRO No. 6.12: Continuación.	114
CUADRO No. 6.13: Comparación de λ teórico y experimental, Galería de Interconexión.	114
CUADRO No. 6.13: Continuación.	115
CUADRO No. 6.14: Procesamiento de resultados, escenarios 1 y 3.	116
CUADRO No. 6.15: Procesamiento de resultados, escenarios 4 y 6.	116
CUADRO No. 6.15: Continuación.	117
CUADRO No. 6.16: Procesamiento de resultados, escenarios 7 y 8.	117
CUADRO No. 6.17: Procesamiento de resultados, coeficiente de fricción (λ). ..	118
CUADRO No. 6.17: Continuación.	119

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA No. 1.1: Planta de la captación del río Pilatón.	2
FIGURA No. 1.2: Implantación de la presa Toachi.	6
FIGURA No. 1.3: Esquema de la operación conjunta de los dos sistemas.	11
FIGURA No. 2.1: Esquemas para la evaluación de los niveles de energía en la bocatoma de la Presa Toachi: a) Vista lateral bocatoma, b) Vista en planta estructura de unión.	15

FIGURA No. 2.2: Esquema de la obtención del nivel de energía del punto de interconexión de los flujos.	16
FIGURA No. 2.3: Esquema de Rejilla en la Bocatoma del Embalse Toachi.	19
FIGURA No. 2.4: Esquema de la transición Túnel de Descarga Sarapullo - Galería de Interconexión.....	20
FIGURA No. 2.5: Esquema de la transición Galería de Interconexión - Túnel de Presión Alluriquín.	21
FIGURA No. 2.6: Esquema en planta de la Estructura de Unión Sarapullo – Toachi.	21
FIGURA No. 2.7: Esquema del desarrollo de la capa límite.....	23
FIGURA No. 2.8: Desarrollo del desprendimiento de la capa límite (despegue)..	24
FIGURA No. 2.9: Desarrollo de la capa límite en un fluido perfecto.....	24
FIGURA No. 2.10: Desarrollo de la capa límite en un fluido real.....	25
FIGURA No. 2.11: Variación de la velocidad dentro de la capa límite.	26
FIGURA No. 2.12: Desarrollo de la capa límite sobre una placa plana.	27
FIGURA No. 3.1: Coeficientes de Pérdida k_{S-G} en función de la relación Q_T/Q_G para unión de conductos a 60° y 90° , a partir de los ábacos propuesto por D.S. Miller.....	32
FIGURA No. 3.2: Coeficientes de Pérdida k_{T-G} en función de la relación Q_T/Q_G para unión de conductos a 60° y 90° , a partir de los ábacos propuesto por D.S. Miller.....	33
FIGURA No. 3.3: Esquema de la Estructura de Unión en base al manual de Idelchik.	34
FIGURA No. 3.4: Coeficientes de Pérdida k_{S-G} en función de la Relación Q_T/Q_G para una relación de áreas igual a 1, a partir de los ábacos de I. E. Idelchik.....	36
FIGURA No. 3.5: Coeficientes de Pérdida k_{T-G} en función de la Relación Q_T/Q_G para una relación de áreas igual a 1, a partir de los ábacos de I. E. Idelchik.....	37
FIGURA No. 3.6: Niveles de energía en el tramo túnel de descarga Sarapullo - Galería de Interconexión.	42
FIGURA No. 3.7: Niveles de energía experimentales en el tramo: Bocatoma de la presa Toachi-final de Galería de Interconexión.....	43
FIGURA No. 5.1: Tanques de abastecimiento al Túnel de Descarga Sarapullo. .	60
FIGURA No. 5.2: Sección transversal del Túnel de Descarga Sarapullo.	65

FIGURA No. 5.3: Sección transversal de la Bocatoma del Embalse Toachi.	66
FIGURA No. 5.4: Corte longitudinal de la Bocatoma del Embalse Toachi.	66
FIGURA No. 5.5: Sección transversal de la Galería de Interconexión.	68
FIGURA No. 5.6: Ubicación de vertederos de medida.	72
FIGURA No. 5.7: Esquema de dimensiones del vertedero de medida.	73
FIGURA No. 5.8: Esquema de dimensiones del vertedero de medida.	74
FIGURA No. 5.9: Curva de descarga del vertedero rectangular – Túnel de Descarga Sarapullo.	76
FIGURA No. 5.10: Curva de descarga del vertedero rectangular – Embalse Toachi).	77
FIGURA No. 5.11: Curva de descarga del vertedero triangular – Canal de Descarga del modelo.	77
FIGURA No. 5.12: Curva de descarga del vertedero rectangular – Túnel de Descarga Sarapullo (curva teórica y puntos experimentales).	82
FIGURA No. 5.13: Curva de descarga del vertedero rectangular – Embalse Toachi (curva teórica y puntos experimentales).	82
FIGURA No. 5.14: Coeficiente de pérdida de energía local en el tramo 1 – 5 versus número de Reynolds.	85
FIGURA No. 5.15: Coeficiente de pérdida de energía local en el tramo 8 – 5 versus número de Reynolds.	86
FIGURA No. 5.16: Diagrama de Moody, Prueba No. 1.	87
FIGURA No. 5.17: Diagrama de Moody, Prueba No. 2.	88
FIGURA No. 5.18: Diagrama de Moody, Prueba No. 3.	88
FIGURA No. 5.19: Diagrama de Moody, Prueba No. 4.	89
FIGURA No. 6.1: Ubicación de puntos de medición de niveles piezométricos	92
FIGURA No. 6.2: Ubicación de puntos de medición de niveles piezométricos ..	100
FIGURA No. 6.3: Variación k_{39} con respecto a Reynolds, escenarios 1, 3 y 4. ...	102
FIGURA No. 6.4: Variación k_{49} con respecto a Reynolds, escenarios 1, 3 y 4. ...	102
FIGURA No. 6.5: Variación de k_{49} con respecto a Reynolds, escenarios 2 y 7. .	103
FIGURA No. 6.6: Variación de k_{49} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 2 y 7.	104
FIGURA No. 6.7: Variación de k_{39} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 2 y 7.	105

FIGURA No. 6.8: Variación de k_{49} con respecto a Reynolds, escenarios 2 y 7..	105
FIGURA No. 6.9: Variación de k_{49} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 8 y 9.	106
FIGURA No. 6.10: Diagrama de Moody, Galería de Interconexión.	109
FIGURA No. 6.11: Diagrama de Moody, Túnel de Descarga Sarapullo.	109
FIGURA No. 6.12: Comparación de los valores experimentales de k_{39} con los recomendados según D. Miller.	110
FIGURA No. 6.13: Comparación de los valores experimentales de k_{49} con los recomendados según D. Miller.	111
FIGURA No. 6.14: Comparación de los valores experimentales de k_{39} con los valores recomendados por I´delchik. Grupos 1, 2 y 3.	112
FIGURA No. 6.15: Variación de coeficientes de pérdida local K_{49} con respecto a relación de caudales, I´delchik. Escenarios 2, 5, 6, 7, 8 y 9.	113
FIGURA No. 6.16: Comparación entre λ teórico y experimental, Túnel de Descarga Sarapullo.	114
FIGURA No. 6.17: Comparación de λ teórico y experimental, Galería de Interconexión.	115

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA No. 5.1.- Replanteo Tanque de Descarga.	59
FOTOGRAFÍA No. 5.2: Tanques de abastecimiento para el Túnel de Descarga Sarapullo.	61
FOTOGRAFÍA No. 5.3: Vista lateral de los tanques de entrada al Túnel de Descarga Sarapullo.	61
FOTOGRAFÍA No. 5.4: Vista superior del tanque 4 de entrada al Túnel de Descarga Sarapullo.	62
FOTOGRAFÍA No. 5.5: Construcción tanque de abastecimiento Presa Toachi...	63
FOTOGRAFÍA No. 5.6: Vista frontal del tanque de abastecimiento Presa Toachi.	63
FOTOGRAFÍA No. 5.7: Vista lateral del tanque de abastecimiento Presa Toachi.	64

FOTOGRAFÍA No. 5.8: Estructura de Transición Túnel de Descarga Sarapullo – Estructura de Unión.....	65
FOTOGRAFÍA No. 5.9: Moldeado Bocatoma de la Presa Toachi.....	67
FOTOGRAFÍA No. 5.10: Pieza en acrílico de la Bocatoma de la Presa Toachi...	67
FOTOGRAFÍA No. 5.11: Armado de la Galería de Interconexión.	68
FOTOGRAFÍA No. 5.12: Moldeado en acrílico de la transición.....	68
FOTOGRAFÍA No. 5.13: Montaje de piezas en acrílico del modelo.....	69
FOTOGRAFÍA No. 5.14: Modelo de Estructura de Unión Sarapullo-Toachi.	69
FOTOGRAFÍA No. 5.15: Tubería y accesorios correspondientes al tanque de abastecimiento del túnel de descarga Sarapullo.	70
FOTOGRAFÍA No. 5.16: Válvula de aire colocada en la parte superior de la tubería.	71
FOTOGRAFÍA No. 5.17: Tubería y accesorios correspondientes al tanque de abastecimiento del Embalse Toachi.....	71
FOTOGRAFÍA No. 5.18: Vertedero rectangular 1, en operación.	73
FOTOGRAFÍA No. 5.19: Vertedero rectangular 2, en operación.	74
FOTOGRAFÍA No. 5.20: Vertedero triangular 3, en operación.	75
FOTOGRAFÍA No. 5.21: Limnómetro.....	76
FOTOGRAFÍA No. 5.23: Prueba No 1, Escenario No. 2, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.31$; $Q_T/Q_G = 0.69$	83
FOTOGRAFÍA No. 5.24: Prueba No 2, Escenario No. 1, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.38$, $Q_T/Q_G = 0.62$	84
FOTOGRAFÍA No. 5.25: Prueba No 3, Escenario No. 5, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.16$; $Q_T/Q_G = 0.84$	84
FOTOGRAFÍA No. 5.26: Prueba No 4, Escenario No.6, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.19$; $Q_T/Q_G = 0.81$	84
FOTOGRAFÍA No. 6.1: Escenario No. 1, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.38$; $Q_T/Q_G = 0.62$	95
FOTOGRAFÍA No. 6.2: Escenario No. 2, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.31$; $Q_T/Q_G = 0.69$	96
FOTOGRAFÍA No. 6.3: Escenario No. 3, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.36$; $Q_T/Q_G = 0.64$	96

FOTOGRAFÍA No. 6.4: Escenario No. 4, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.38$; $Q_T/Q_G = 0.62$.	97
FOTOGRAFÍA No. 6.5: Escenario No. 5, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.16$; $Q_T/Q_G = 0.84$.	97
FOTOGRAFÍA No. 6.6: Escenario No. 6, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.19$; $Q_T/Q_G = 0.81$.	98
FOTOGRAFÍA No. 6.7: Escenario No. 7, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.29$; $Q_T/Q_G = 0.71$.	98
FOTOGRAFÍA No. 6.8: Escenario No. 8, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.06$; $Q_T/Q_G = 0.94$.	99
FOTOGRAFÍA No. 6.9: Escenario No. 9, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0$; $Q_T/Q_G = 1$.	99

ÍNDICE DE PLANOS

MH3.PHC-001	Implantación de Modelo en laboratorio del CIERHI
MH3.PHC-002	Vista en planta de Modelo e infraestructura
MH3.PHC-003	Cortes laterales de Modelo y estructuras de
MH3.PHC-004	Perfil longitudinal de Modelo, vista en planta
MH3.PHC-005	Detalle de Bocatoma y secciones transversales de estructuras
MH3.PHC-006	Cortes transversales y vertederos de medida

SIMBOLOGÍA

a	altura de sección
A	área de sección transversal
b	ancho de sección
D	Diámetro de tubería
g	valor de gravedad
K	coeficiente de pérdida local
L	longitud de tubería
L.P.	línea piezométrica
L.E.	línea de energía
n	coeficiente de rugosidad Manning
Q	Caudal
Q _A	Caudal de túnel de carga hacia la Central Alluriquín
Q _e	Caudal Ecológico igual a 4.14m ³ /s
Q _{máx}	Caudal máximo
Q _{mín}	Caudal mínimo
Q _S	Caudal de túnel Sarapullo
Q _T	Caudal de entrada por bocatoma Toachi incluido el Caudal Ecológico
Re	Número de Reynolds
Rh	Radio Hidráulico
V	Velocidad media
ε	Rugosidad absoluta

Δh_f	Pérdidas por fricción en tubería
λ	Función de rugosidad relativa
λ_p	rugosidad relativa en Prototipo
λ_m	rugosidad relativa en Modelo
ν	Viscosidad cinemática

RESUMEN

El presente proyecto tiene por objetivo principal la evaluación del funcionamiento hidráulico de la Estructura de Unión Sarapullo – Toachi del Proyecto Hidroeléctrico Toachi – Pilatón y la optimización de la geometría de las obras hidráulicas que lo componen.

Para la investigación se construyó un modelo físico a escala 1:20, diseñado para reproducir y evaluar la resistencia al movimiento de la masa de agua bajo el requerimiento de unión de dos flujos de velocidades diferentes en magnitud y en la distribución en la sección transversal. El caso de estudio trata de una estructura en forma de “yee”, que une los flujos provenientes tanto del túnel de descarga Sarapullo como de la Bocatoma del Embalse Toachi.

El modelo tiene como componentes principales el túnel de descarga Sarapullo, la bocatoma del embalse Toachi, la Yee de Interconexión y la Galería de Interconexión.

El estudio experimental se desarrolló en tres fases. La Fase I comprende la investigación teórica del comportamiento de estructura hidráulica, la construcción del modelo, la calibración y la validación del mismo; la Fase II incluye el análisis del flujo en la estructura de unión con el diseño original; y la Fase III contempla ensayos de comprobación, agrupando los escenarios de operación según la relación de caudales que tiene cada uno de ellos.

En base a los resultados obtenidos en las Fase II y Fase III, se puede concluir que las secciones de la estructura de unión y de los elementos que la componen son efectivas para los caudales de diseño.

ABSTRACT

This project is primarily intended for performance evaluation hydraulic Junction Structure Sarapullo – Toachi, Toachi – Pilatón Hydroelectric Project and optimization of the geometry of the hydraulic structures that composes it.

For the research we built a 1:20 scale physical model, designed to replicate and evaluate the resistance to movement of the water body under the joint request of two streams of different speeds in magnitude and distribution in the cross section. The case in study is a structure in “yee” shape, linking flows from Sarapullo’s Tunnel and Toachi’s Dam Intake.

The model has as main components Sarapullo’s discharge tunnel, Toachi’s Dam Intake, Junction Structure and Interconnection Gallery.

The experimental study was divided in three stages. Stage I covers the theoretical research of the hydraulic behaviour of the structures, model building, calibration and its validation, the Stage II includes the analysis of the flow in the junction structure with de original design, and Stage III trials includes test grouping the operating sceneries according to the ratio of flow that through each one of them.

Based on the results obtained in Phase II and Phase III, one can conclude that the sections of the union structure and its components are effective for the design flows.

PRESENTACIÓN

En la modelación hidráulica es importante efectuar un análisis previo del funcionamiento de la estructura prototipo, utilizando los criterios y las bases de la literatura técnica. Con el fin de que el dimensionamiento del modelo, el plan de pruebas y las mediciones que se realicen sean las adecuadas; sin embargo cabe tomar en cuenta que los criterios de la literatura técnica fueron desarrollados en base a experiencias de sus autores, por lo que el respaldo bibliográfico trae consigo incertidumbre al momento de su aplicación.

El estudio experimental con ayuda de un modelo físico de una estructura hidráulica permite reproducir fenómenos de flujo vinculados con la estructura bajo análisis. No obstante, su uso apropiado y eficiente está limitado por el conocimiento y la experiencia que el investigador tenga sobre la hidráulica básica del fenómeno bajo análisis.

En el presente proyecto de titulación se considera el modelo de mayor tamaño tal que permita visualizar de manera apropiada los fenómenos que se presentan en la estructura en estudio, es así que se selecciona la escala de longitudes 1:20, tomando en cuenta las disponibilidades de espacio y de caudales en el laboratorio del Centro de Investigaciones y Estudios del Recurso Hídrico (CIERHI).

El modelo consiste en un estructura en forma de “yee”, que tiene como función la unión de dos flujos provenientes tanto del túnel de descarga de la Central Sarapullo como del la bocatoma de la Presa Toachi. Aguas abajo de la estructura de unión se tiene la Galería de Interconexión tramo en donde se produce la mezcla de los dos flujos.

Se realiza pruebas con los nueve escenarios de operación de la estructura de interconexión de las Centrales Sarapullo y Alluriquín y como comprobación para los resultados obtenidos en las pruebas iniciales se efectúa cinco pruebas adicionales tomando en cuenta la relación de caudales que los escenarios tienen en común.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS SARAPULLO Y ALLURIQUÍN

El Proyecto Toachi – Pilatón está conformado por dos aprovechamientos en cascada, llamados Pilatón – Sarapullo y Toachi – Alluriquín, que en conjunto generan una energía total anual de 1100 GWH, con una capacidad instalada total de 253 MW en las centrales. Adicionalmente, se dispondrá de una mini central al pie de la presa del Toachi, de 1.4 MW, que turbinará en forma constante el caudal ecológico de 4.14 m³/s.

Se ubica en la vertiente de drenaje del Pacífico, al sur-oeste de la ciudad de Quito, en los límites de las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi, en sus cantones Mejía, Santo Domingo y Sigchos, respectivamente, y sus parroquias Manuel Cornejo Astorga, Alluriquín y Palo Quemado.

El proyecto se desarrolla tanto en la cuenca del río Pilatón como en la cuenca del río Toachi, la primera se extiende sobre una longitud aproximada de 40 Km y un ancho de 20 Km, con un área de drenaje hasta el sitio de la captación (cota 1099 msnm) es de 521 Km², la cuenca del río Toachi hasta el sitio de la presa (cota 914 msnm), tiene un área de drenaje de 1476 Km² y se extiende sobre una longitud de 85 Km con un ancho medio de 20 Km.

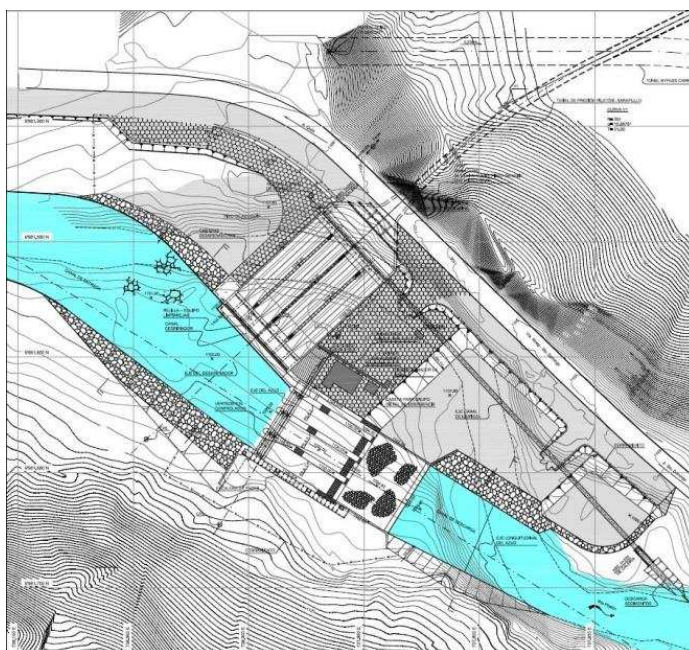
A continuación se presenta la descripción de los dos aprovechamientos que forman parte de este proyecto y de los elementos comprendidos en cada uno de ellos.

1.1.1 APROVECHAMIENTO PILATÓN-SARAPULLO

1.1.1.1 Captación del río Pilatón

La captación del río Pilatón se realiza a la altura del Km 60 de la vía Aloag - Santo Domingo, ubicada en las coordenadas N 9°96'16.30"; E 73°79'80", y la conforman las estructuras hidráulicas que se describen a continuación:

FIGURA No. 1.1: Planta de la captación del río Pilatón.



Fuente: Descripción del Proyecto, HIDROTOAPI E.P., Febrero 2011.

1.1.1.1.1 Azudes - Vertederos

Son tres vertederos que se encuentran implantados en la margen derecha del río, separados por pilas y muros de 2.50 metros de ancho. La estructura de los azudes es construida de hormigón, y ocupa un ancho de 33.90 m por 41.15 m de longitud.

Para mantener el nivel de operación de captación 1105 msnm, los vertederos son controlados por compuertas radiales de B x H = 8.20 m x 5.00 m, que en la parte

superior de las mismas están provistas de una clapeta de 1.40 m de altura. La cresta de los vertederos se encuentra en la cota 1100 msnm, 1.00 m más alta que el fondo del canal de aproximación (nuevo cauce del río) y estas estructuras son diseñadas para un caudal de crecidas de 480 m³/s, correspondiente a un periodo de retorno de 500 años.

1.1.1.1.2 Estructura de la Toma

Esta estructura tiene una rejilla de 39 m de longitud y 1.60 m de altura, la toma está conformada por 8 aberturas de B x H = 4.00 m x 1.60 m, que permiten la captación de los caudales de hasta 40 m³/s, los mismos que serán turbinados en la casa de máquinas de la central Sarapullo para luego alimentar parcialmente al aprovechamiento Toachi – Alluriquín.

Delante de la rejilla, se dispone de un canal desripador de 2.50 m de ancho por 41.00 m de longitud, con pendiente del 4%, que está controlado por una compuerta radial de B x H = 2.50m x 2.00 m, que lo conecta con el canal de limpieza, con una pendiente de 10.50% y que está dispuesto paralelamente al lado izquierdo de los azudes.

1.1.1.1.3 Desarenadores

La estructura está conformada por cuatro desarenadores que trabajan en paralelo, cada uno con doble cámara de sedimentación, con dimensiones: L x B x H = 40,00 m x 9,00 m x 4,50 m, con una transición de entrada de 9,00 m de longitud.

La estructura de los desarenadores está diseñada para retener sólidos de diámetros mayores a 0.3 mm. Después de los desarenadores las aguas serán vertidas a un tanque que constituye la embocadura al túnel de carga de la central Sarapullo, con una cota en la solera de 1095 msnm.

1.1.1.2 Obras de Conducción

1.1.1.2.1 Túnel de Presión

Estructura con una sección interna circular de 3.80m de diámetro, que cuenta con un revestimiento de hormigón de 0.30 m de espesor, con una longitud aproximada de 5.90 Km.

1.1.1.2.2 Chimenea de Equilibrio Superior

Está compuesta por un pozo vertical inferior (garganta) con un diámetro interior útil de 3,50 m, que se prolonga hasta la cota 1065 msnm, a partir de este nivel, el pozo principal de la chimenea es de 12,00 m de diámetro, llegando a la cota 1129 msnm. La chimenea se ubica a 55 m aguas abajo del inicio de la tubería de presión y está desplazada 20 m del eje de la conducción.

1.1.1.2.3 Tubería de presión

La tubería principal es de 3.00 m de diámetro interno y 107 m de longitud hasta el inicio de los ramales distribuidores, que tienen una sección interna circular de 1.75 m de diámetro. En el tramo final, estos ramales reducen su diámetro interno a 1,60 m para su unión con las válvulas de guardia tipo mariposa.

1.1.1.3 Casa de máquinas de Sarapullo

1.1.1.3.1 Central Sarapullo

La casa de máquinas es subterránea con tres turbinas tipo Francis que tienen una potencia nominal por unidad de 16.3 MW, para una caída neta de 138.30 m y caudal de diseño de 13.33 m³/s, logrando así una potencia total instalada de la central de 49 MW. Los ejes de las turbinas se encuentra en la cota 953 msnm y la contra carga máxima para las mismas está dada por la cota del embalse del Toachi, 970 msnm.

1.1.1.4 Obras de Descarga

1.1.1.4.1 Chimenea de equilibrio inferior

Tiene una cámara inferior de sección tipo baúl de área útil $L \times B \times H = 40 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 24 \text{ m}$, con la solera a la cota 953 msnm.

1.1.1.4.2 Túnel de descarga

Es de sección circular de 3.80 m de diámetro interno, revestido con hormigón, con una longitud de 470 m hasta empatar con la obra de toma de la presa Toachi; la cota de inicio del túnel es la 953 msnm y su pendiente longitudinal es igual a 2%.

1.1.1.5 Patio de Maniobras Sarapullo

El patio de maniobras es exterior y en él está ubicado el transformador de 60 MVA, 13.8/230 KV y el equipo necesario para la conexión a la Línea de Transmisión de 230 KV Sarapullo-Alluriquín.

1.1.2 APROVECHAMIENTO TOACHI-ALLURIQUÍN

1.1.2.1 La Presa Toachi y sus obras anexas

1.1.2.1.1 Presa Toachi

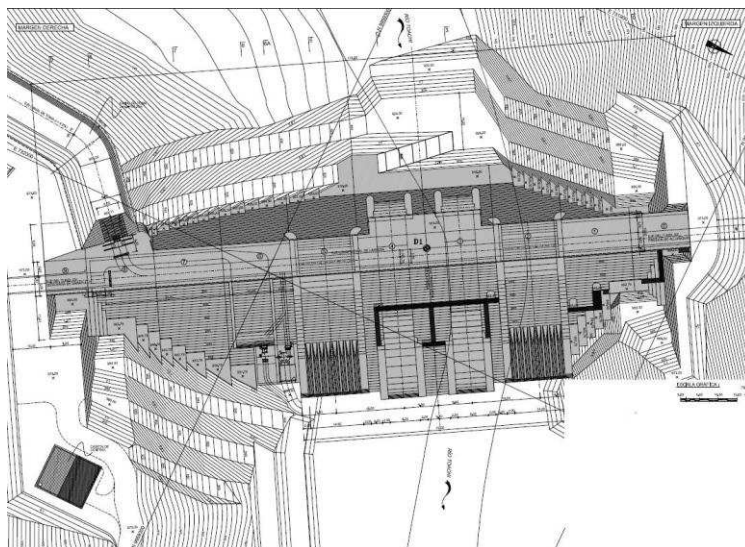
Se encuentra ubicada inmediatamente aguas abajo de la confluencia de los ríos Pilatón y Toachi, en las coordenadas N 9'959340; E 731980.

La presa es una estructura de hormigón a gravedad, con una altura máxima de 60 m, su corona se encuentra en la cota 973 msnm, tiene una longitud de 170.50 m y 10 m de ancho. Los paramentos aguas arriba y aguas abajo son inclinados V:H= 1:0.3 y 1:0.7, respectivamente.

La presa está constituida por 10 bloques, 8 de ellos de 18 m de ancho y los bloques 1 y 9 de 15.50 y 11.00 m de ancho respectivamente. Los bloques 2, 3, 4, 5, 6 y 8 contienen estructuras hidráulicas importantes, como son: canal de alimentación de la toma, obra de toma y conexión con el túnel de descarga Sarapullo, vertederos de exceso, desagües de fondo y mini central a pie de presa.

Produce un embalse de regulación diaria del caudal firme del Proyecto de 2 millones de m³ entre sus niveles de operación, máximo (970 msnm) y mínimo (965 msnm), y su volumen total es de 8.5 millones de m³.

FIGURA No. 1.2: Implantación de la presa Toachi.



Fuente: Descripción del Proyecto, HIDROTOAPI E.P., Febrero 2011.

1.1.2.1.2 Canal de alimentación de la toma

Se ubica en la margen derecha de la presa delante de la toma, tiene un sección trapezoidal, de 8 m de base, una longitud de 100 m y su pendiente es de 4.5%, con una profundidad en la cabecera de 7 m y de 11.33 m delante de la toma.

La margen derecha del canal de alimentación de la toma, se empotra longitudinalmente a la roca y sube hasta la cota 973 msnm, en tanto que su margen izquierda, que es un muro libre, dispone de un vertedero a la cota 964 msnm, que funcionará sumergido para alimentar al canal.

1.1.2.1.3 Obra de Toma y Conexión con el túnel de descarga de Sarapullo.-

La toma se encuentra ubicada en el paramento aguas arriba del bloque 8 de la presa. Su embocadura cambia de la sección inicial de B x H = 5.75 m x 7.85 m a 3.50 m x 5.60 m, en donde dispone de una compuerta plana. Inmediatamente después de la misma se une con la galería de interconexión, de las mismas dimensiones.

Delante de la obra de toma se dispone de una rejilla. La velocidad del flujo a través de la misma resulta alrededor de 2 m/s para un caudal de 60 m³/s y alrededor de 3 m/s para un caudal de 100 m³/s.

1.1.2.1.4 Pozo y vertedero de excesos Sarapullo.-

El bloque 8 aloja al pozo que conecta a la descarga de Sarapullo con la galería de B x H = 2.00 m x 3.50 m dispuesta al nivel 969 msnm, que a su vez se conecta a través del bloque 7 con el vertedero existente en bloque 6, cuya cresta a la cota 970 msnm, produce la contra carga requerida por las turbinas de la casa de máquinas de Sarapullo cuando la Central Alluriquín está fuera de funcionamiento. Este vertedero de 10 m de ancho descargará al río los caudales turbinados en Sarapullo por medio de un salto de esquí.

1.1.2.1.5 Mini central a pie de presa

La casa de máquinas de la mini central, está ubicada al pie de la presa en el bloque 6, genera 1.4 MW y turbinará el caudal ecológico del río Toachi, de 4.14 m³/s, en una turbina tipo Francis de eje vertical, utilizando la altura bruta de 42 m que provee el embalse.

1.1.2.1.6 Vertederos de excesos

Los dos vertederos de excesos se encuentran en los bloques 2 y 5 de la presa, están controlados por compuertas tipo clapeta de B x H = 14.00 m x 7.50 m, accionadas por servomotores. La cresta de los vertederos se encuentra en la cota

962.50 msnm. Las compuertas podrán descargar el caudal de crecidas con período de recurrencia de mil años, correspondiente a $965 \text{ m}^3/\text{s}$.

La descarga de los vertederos se efectúa por medio de saltos de esquí, cuyo labio se encuentra en la cota 933.74 msnm. El diseño del tramo final del esquí cuenta con 8 deflectores que permitirán airear los chorros y lograr una mejor disipación de energía aguas abajo de la presa. Los labios de todos los deflectores llegan a la cota 936.92 msnm.

1.1.2.1.7 Desagües de fondo

Los dos desagües de fondo se encuentran ubicados en los bloques 3 y 4, están controlados por compuertas radiales de $B \times H = 8.00 \text{ m} \times 8.00 \text{ m}$, accionadas por servomotores. La cresta de los desagües se encuentra en la cota 927.00 msnm. Los dos desagües de fondo tendrán capacidad para descargar $800 \text{ m}^3/\text{s}$ libres de sumersión.

La descarga de los desagües de fondo se efectúa por medio de saltos de esquí, cuyo labio se encuentra en la cota 921.94 msnm.

1.1.2.1.8 Estanque disipador de energía

El estanque disipador de energía se encuentra a continuación del enrocado de escollera y tiene como función proteger a la presa. Sus dimensiones son de aproximadamente 70 m de ancho y 65 m de longitud.

1.1.2.1.9 Galería de Interconexión entre los dos aprovechamientos

La galería de interconexión atraviesa longitudinalmente la presa, sus dimensiones son $B \times H = 3.50 \text{ m} \times 5.60 \text{ m}$.

1.1.2.2 Obras de conducción

1.1.2.2.1 Túnel de carga Toachi – Alluriquín

Inicia en la cota 952 msnm, al final de galería de interconexión. Cuenta con una sección interna circular, de 5.60 m de diámetro, íntegramente revestido con hormigón de 0.30 m de espesor. La longitud del túnel es de 8.65 Km hasta el inicio del blindaje de acero de la tubería de presión, con la cota 779.50 msnm.

1.1.2.2.2 Chimenea de equilibrio superior Alluriquín

Se ubica 38 m aguas abajo del inicio de la tubería de presión y está desplazada 20 m del eje de la conducción, está compuesta por un pozo vertical inferior (garganta) con un diámetro interior útil de 3.50 m que se prolonga hasta la cota 905 msnm, a partir de este nivel, el pozo principal de la chimenea es de 15.00 m de diámetro, llegando a la cota 1014 msnm.

1.1.2.2.3 Tubería de presión

El ramal principal es de 4.70 m de diámetro interno y 180 m de longitud hasta el inicio de los ramales distribuidores, los que son de acero de 2.70 m de diámetro interno. En el tramo final de estos ramales reducen su diámetro interno a 2.60 m para su unión con las válvulas de guardia tipo mariposa.

1.1.2.3 Casa de máquinas de Alluriquín

Casa de máquinas subterránea provista de tres turbinas Francis de eje vertical, con potencia nominal por unidad de 68 MW, para una caída neta de 231 m y caudal de diseño de 33,33 m³/s, dando una potencia total instalada de 204 MW. La cota del eje de las turbinas es 732 msnm y la contra carga está dada por la cota de restitución al río 737 msnm.

1.1.2.4 Obras de descarga

1.1.2.4.1 Chimenea de equilibrio inferior Alluriquín

Posee una cámara inferior de sección tipo baúl con un área útil $L \times B \times H = 41 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 36 \text{ m}$. Su solera se encuentra en la cota 722,40 msnm.

1.1.2.4.2 Descarga Alluriquín

Es de sección circular cuyo diámetro interno es de 5,60 m y tiene 504 m de longitud.

1.1.2.5 Subestación Alluriquín

La subestación Alluriquín es exterior y está ubicada entre el carretero y el río. Es del tipo SF6 y permitirá la conexión del Proyecto con las Líneas del Sistema Nacional Interconectado. El patio de maniobras es exterior y en él está ubicado el transformador de 13.8/230 KV y el equipo necesario para la conexión a la Línea de Transmisión de 230 KV Sarapullo- Alluriquín.

En el Cuadro No. 1.1 se describe las características de las casas de máquinas del proyecto Toachi - Pilatón.

CUADRO No. 1.1: Características de las casas de maquinas del proyecto Toachi Pilatón.

Aprovechamiento	Casa de Máquinas	# Turbinas	Tipo Turbina	Potencia (MW)	Q máx. (m ³ /s)	H bruta máx. (m)
Pilatón-Sarapullo	Sarapullo	3	Francis	49	40	140
Toachi-Alluriquín	Alluriquín	3	Francis	204	100	234
Presa Toachi	Toachi	1	Francis	1.4	4.14	42

Fuente: Descripción del Proyecto, HIDROTOAPI E.P., Febrero 2011.

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

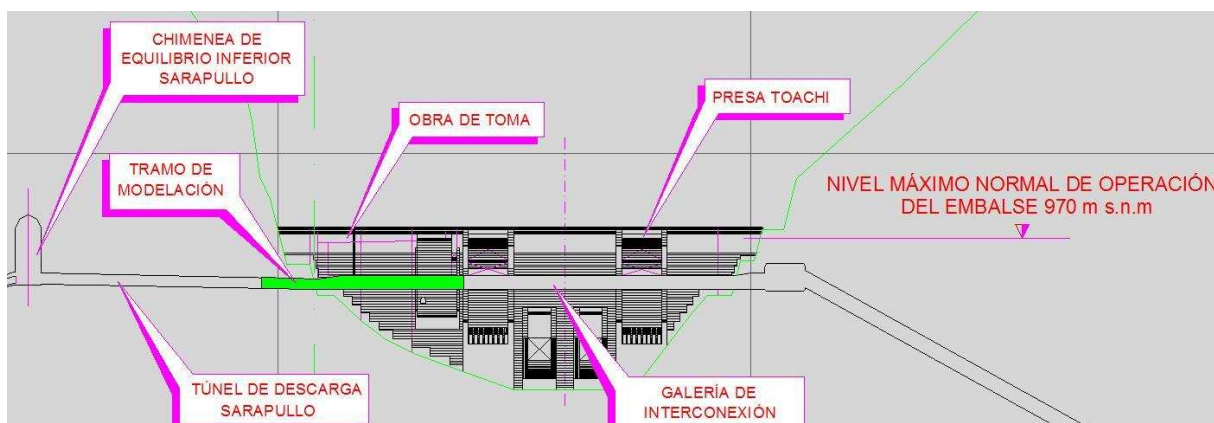
1.2 GENERALIDADES SOBRE LA OPERACIÓN CONJUNTA DE LOS DOS SISTEMAS EN SU DISEÑO ORIGINAL

El Proyecto Hidroeléctrico Toachi – Pilatón propone la unión de las aguas del Río Pilatón, luego de ser turbinadas en la casa de máquinas Sarapullo, con las aguas captadas en la obra de toma de la Presa Toachi, para posteriormente ser conducidas a la Central Hidroeléctrica Alluriquín. Dicha interconexión se la realiza en la denominada Estructura de Unión Sarapullo – Toachi. Esta estructura, que conecta hidráulicamente las Centrales Hidroeléctricas Sarapullo y Alluriquín, se encuentra ubicada en el bloque 8 de la Presa Toachi.

En el bloque 8 de la presa, además se encuentra una compuerta plana que desconecta la interconexión en caso de que la central Alluriquín esté fuera de servicio. Es por esto que, al producirse este escenario, en el bloque 6 de la presa existe un vertedero que tiene como función producir la contra carga requerida por las turbinas de la casa de máquinas de Sarapullo.

La suma de los caudales de los dos ríos son conducidos a la Central Alluriquín por medio del túnel de carga de aproximadamente 8.63 km de longitud, que une tanto el embalse del Toachi como el túnel de Descarga Sarapullo a la Central Alluriquín para una potencia instalada de 204 MW (Figura No. 1.3).

FIGURA No. 1.3: Esquema de la operación conjunta de los dos sistemas.



Fuente: PG-GEN-003, 6526.0-P-103, HIDROTOAPI E.P., Enero 2010.

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares.

La estructura de unión durante su funcionamiento normal debe permitir una adecuada circulación del flujo y evitar que se desperdicien los caudales turbinados en la Central Sarapullo. El sistema hidráulico debe impedir que los fenómenos de transitorios hidráulicos interrumpen la generación de energía aguas abajo en la Central Alluriquín.

1.3 SÍNTESIS DE LOS REQUERIMIENTOS PARA LA SIMULACIÓN EN MODELO FÍSICO DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN O DE INTERCONEXIÓN DE LAS DOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Para la investigación de la estructura de unión de las centrales Sarapullo y Alluriquín, la realización de un modelo físico debe cumplir ciertas condiciones que ayudan a la compatibilidad del modelo con la estructura prototipo, tales como:

- Criterios de similitud que garanticen la semejanza entre prototipo y modelo.
- Niveles o profundidades mínimas de agua dentro de los elementos que componen la estructura de unión, para viabilizar el análisis del funcionamiento de la misma bajo los diferentes escenarios de operación.
- Escala o relación de magnitudes, donde las dimensiones de los elementos que componen la estructura de interconexión y las condiciones de ensayo deben satisfacer con el criterio de similitud.

1.4 ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES DE SOLUCIÓN: MODELACIÓN FÍSICA Y MODELACIÓN NUMÉRICA

El estudio del funcionamiento de una estructura hidráulica, se lo puede realizar tanto con un modelo numérico o con la ayuda de un modelo físico. En general, los métodos numéricos de cálculo plantean soluciones idealizadas del fenómeno natural por la dificultad de los procesos matemáticos para la exacta solución. Por tal razón, es importante recurrir a un estudio experimental con un modelo físico

que permita la comprensión y visualización de los fenómenos de flujo que se presentan en la estructura bajo análisis. No obstante, el uso apropiado y eficiente del modelo físico depende de la correcta interpretación que se dé a los resultados obtenidos.

1.5 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar experimentalmente y caracterizar el funcionamiento hidráulico de la convergencia de dos flujos a presión con diferentes velocidades medias, para el caso particular de la estructura de unión de las centrales Sarapullo y Alluriquín.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El estudio en modelo físico debe, por lo menos:

- Definir los niveles de energía que garanticen el funcionamiento hidráulico apropiado de la estructura de unión Sarapullo – Toachi.
- Evaluar los coeficientes de pérdidas locales de energía a partir del análisis del funcionamiento hidráulico de la convergencia de los flujos en la estructura de unión Sarapullo – Toachi.
- Examinar la posibilidad de introducción de aire, las posibles zonas de separación y de reflujo en la estructura, para los diferentes escenarios de operación.

1.5.3 ALCANCE

En el presente estudio, el modelo físico reproducirá el comportamiento del flujo a presión de la estructura de interconexión de dos flujos con velocidades de aproximación diferentes provenientes del Túnel de Descarga Sarapullo y la Bocatoma del embalse Toachi, permitiendo visualizar los fenómenos de flujo que se presentan durante la unión y, adicionalmente, verificar y optimizar el dimensionamiento original de los elementos que componen esta estructura.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL FLUJO EN EL INTERIOR DE UNA ESTRUCTURA DE UNIÓN

2.1 DEFINICIONES PARA EL ANÁLISIS DEL FLUJO A PRESIÓN (EN SECCIONES IRREGULARES Y COMPUESTAS): RELACIONES FUNCIONALES RESPECTO DE LA RESISTENCIA AL MOVIMIENTO Y PÉRDIDAS DE ENERGÍA.

En un flujo a presión, el movimiento del agua se efectúa en conductos cerrados sobre los que se ejerce una presión diferente a la atmosférica. En este tipo de flujo las principales fuerzas que intervienen en el análisis hidráulico son las de presión, y son aplicables las ecuaciones básicas de la hidráulica para flujo unidireccional: continuidad, energía y cantidad de movimiento. La aplicación de éstas ecuaciones de la hidráulica es justificable tanto para régimen turbulento como para régimen laminar.

La fricción del agua con las paredes internas de la estructura, la resistencia que producen los cambios de dirección y los accesorios incluidos en la conducción, producen pérdidas de energía cuantificables, cuyo valor es importante conocer para evaluar el nivel energético presente en cada uno de los elementos a estudiarse en el presente trabajo.

En el análisis de las pérdidas de energía se utiliza el valor de la velocidad media, definida por medio de la ecuación de continuidad¹:

$$Q = V \cdot A \rightarrow V = \frac{Q}{A} \quad (2.1)$$

¹ "Hidráulica General", Sotelo A., Volumen I, Editorial LIMUSA S.A. Sexta edición, México, 1982.

Para el cálculo de los niveles de energía en los diferentes tramos del modelo, se utiliza la Ecuación de Energía.

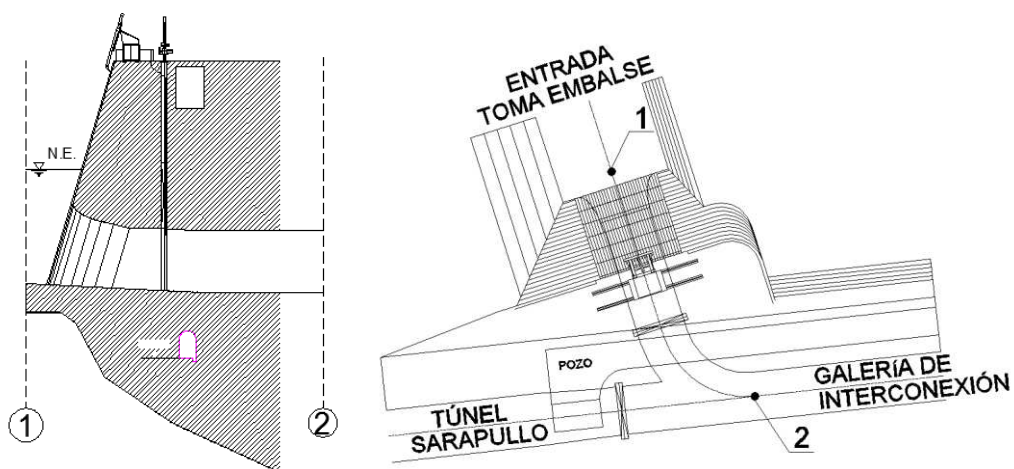
$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha \frac{v_1^2}{2g} = H \quad (2.2)$$

Donde:

α → Coeficiente de variación de la velocidad en la sección transversal o coeficiente de Coriolis.

Para el cálculo del nivel de energía necesario para captar un caudal de $64.14 \text{ m}^3/\text{s}$ por la bocatoma de la Presa Toachi, se toma como sección de control aguas arriba, la sección de la bocatoma y, aguas abajo, la sección en el punto de unión de los dos flujos, tal como se muestra en la Figura No. 2.1. Los cálculos para obtener los niveles de energía son referenciados a la cota 970 msnm, correspondiente al nivel máximo de la Chimenea de Equilibrio Inferior de la Central Sarapullo. En la Figura No. 2.2 se muestra un esquema para obtener el nivel de energía en el punto de interconexión de los flujos.

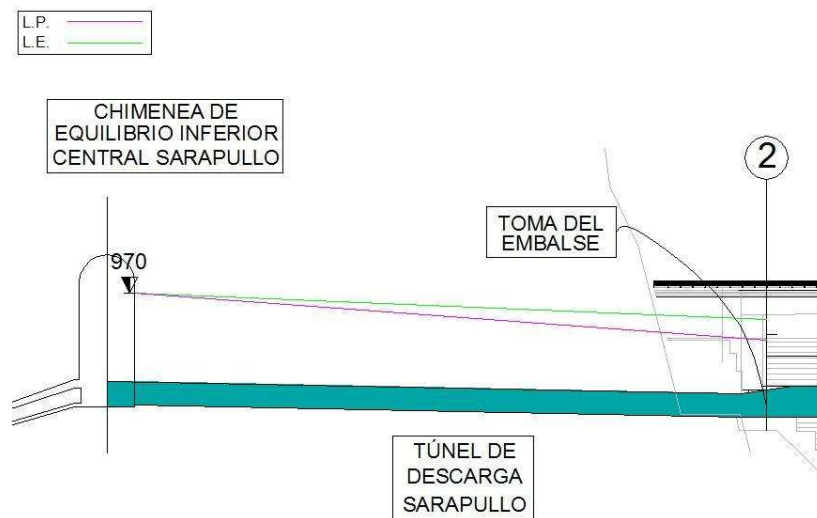
FIGURA No. 2.1: Esquemas para la evaluación de los niveles de energía en la bocatoma de la Presa Toachi: a) Vista lateral bocatoma, b) Vista en planta estructura de unión.



a) Vista lateral Bocatoma

b) Vista en planta estructura de unión

FIGURA No. 2.2: Esquema de la obtención del nivel de energía del punto de interconexión de los flujos.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

2.1.1 CONSIDERACIONES GENERALES DEL FLUJO DE AGUA A PRESIÓN

Al tratarse de un movimiento de agua al interior de conductos cerrados se considera que:

- **Flujo unidimensional**

El campo de velocidad tiene la misma dirección a cualquier distancia del conducto y no depende de la coordenada en la dirección del movimiento².

- **Distribución uniforme de velocidad**

Dentro de los conductos cerrados la distribución de velocidad es uniforme, de magnitud igual a la velocidad media.

- **Flujo permanente**

Las características hidráulicas como la presión, la velocidad, etc.; en cualquier sección no cambian con el tiempo.

² "Introducción a la Mecánica de Fluidos", J. Gratton, 2002.

- **Régimen de flujo turbulento**

Los valores de α , recomendados para régimen turbulento en tuberías, están entre 1.02 a 1.15. De acuerdo a la literatura técnica el valor de $\alpha = 1.00$, no introduce errores en los resultados, es por esto que para el presente estudio se toma $\alpha = 1^3$.

- **Número de Reynolds**

El número de Reynolds representa la influencia relativa de las fuerzas viscosas sobre las fuerzas de inercia. Se evalúa con la siguiente ecuación:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot 4Rh}{\nu} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2.3)$$

2.1.2 PÉRDIDAS DE ENERGÍA

Cuando se trata de conductos cerrados, el tipo de energía que se pierde por razón del movimiento del fluido es la energía de presión, esta pérdida es provocada por dos razones: i) las pérdidas que se deben a la fricción del agua en la tubería, consideradas usualmente pérdidas mayores y, ii) las pérdidas locales inducidas por piezas especiales y demás características de una instalación, tales como curvas, válvulas, piezas de derivación, reducción o aumento de diámetro, etc.; que usualmente constituyen las pérdidas menores.

2.1.2.1 Pérdidas por fricción

Al desplazarse una masa líquida por un conducto se originan esfuerzos tangenciales que se oponen al movimiento debido a la influencia de las rugosidades, de la viscosidad del fluido y la turbulencia del flujo⁴.

Las pérdidas por fricción, en régimen de flujo turbulento, se presentan a lo largo de su longitud debido a la mezcla entre las partículas del fluido y la fricción entre el agua y las fronteras sólidas del conducto.

³ <http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/fpresion.pdf>

⁴ "Hidráulica General", Sotelo A., Volumen I, Editorial LIMUSA S.A. Sexta edición, México, 1982.

Existe un gran número de fórmulas para el cálculo de tuberías con flujo turbulento las cuales se han desarrollado con el objetivo de representar en forma matemática la resistencia al flujo a lo largo de un conducto. Esta resistencia al flujo comprende las fuerzas de fricción.

Las pérdidas por fricción o pérdidas continuas se evalúan con la relación conocida como la ecuación de Darcy - Weisbach⁵:

$$\Delta hf = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = \lambda \cdot \frac{L}{4Rh} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.4)$$

El valor del coeficiente de fricción λ es una función de la rugosidad relativa ($\varepsilon/4R_h$) y del número de Reynolds (Re). Su determinación se realiza con la ayuda de la ecuación de Colebrook - White, la cual se basó en estudios de Nikuradse, Prandtl, von Karman, y es aplicable en tubos lisos o rugosos en la zona de transición o turbulenta⁶.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.71D} + \frac{2.51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad (2.5)$$

2.1.2.2 Pérdidas locales

Se presentan en puntos fijos del conducto por cambios la forma y dimensiones de la sección, cambios en la dirección del agua o por la presencia de secciones de control. Son usualmente las pérdidas menores en una conducción.

El valor de la pérdida localizada o pérdida local, es directamente proporcional a la energía cinética del fluido.

$$h_L = K \cdot \frac{V^2}{2g} = \frac{K}{A^2 \cdot 2g} \cdot Q^2 \quad (2.6)$$

⁵ "Hidráulica de Canales y Estructuras Hidráulicas en Canales", E. Naudascher

⁶ "Hidráulica General", G. Sotelo, Tabla 8.3, pág. 294.

El coeficiente de pérdida localizada generado en la rejilla de la toma del embalse, se calcula en base a la recomendación sobre desagües a presión, como se indica en el Capítulo 10 del libro “*Diseño de Presas Pequeñas*”, *US Bureau of Reclamation*.

$$K = 1.45 - 0.45 \frac{A_n}{A_b} - \left(\frac{A_n}{A_b} \right)^2 \quad (2.7)$$

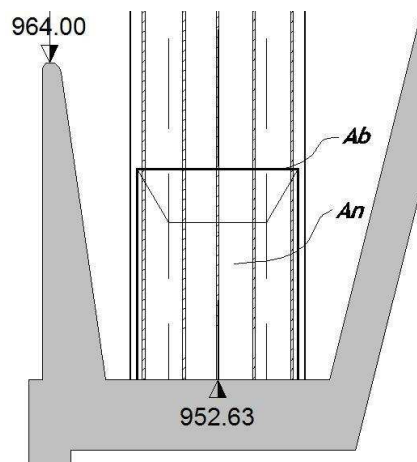
Donde:

A_n → Área neta a través de la rejilla

A_b → Área bruta de la estructura de la rejilla

En la Figura No. 2.3 se muestra un esquema de la rejilla en frente de la toma del embalse Toachi, y se considera que la misma obstruye el 30% de la sección de entrada.

FIGURA No. 2.3: Esquema de Rejilla en la Bocatoma del Embalse Toachi.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

En la sección de entrada a la Toma desde el embalse Toachi o embocadura de la galería de interconexión, se adopta un coeficiente de pérdida local específico y constante, igual a $K_e = 0.28^7$.

⁷ “Hidráulica General”, G. Sotelo, pág. 298.

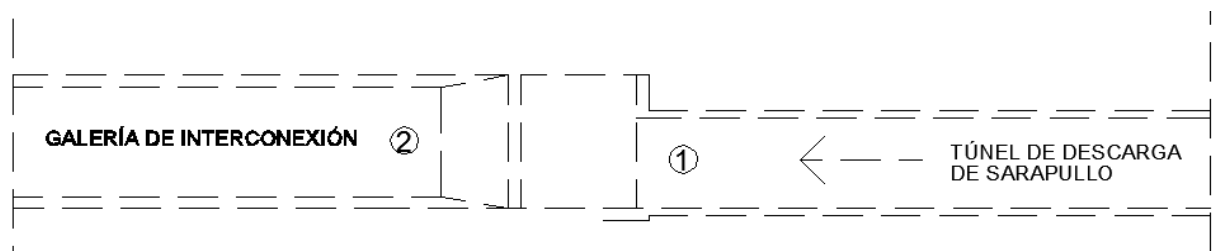
Si bien este coeficiente varía con la ubicación del nivel de la superficie libre del agua en la entrada, para cuando se presentan niveles de sumergencia superiores al mínimo requerido (962.5 msnm), se asume que la variación del coeficiente K_e es pequeña con la profundidad de agua hasta la bocatoma.

Para el cálculo de los coeficientes de pérdidas locales en las transiciones o estructuras de cambio de sección transversal (Figura No. 2.4: Túnel de Descarga Sarapullo - Galería de Interconexión y Figura No. 2.5: Galería de Interconexión - Túnel de Presión Alluriquín), se toman los valores recomendados en el texto *"Handbook of Hydraulic Resistance"*, de *I'delchik*. Primero se evalúa el valor del ángulo de la transición según la ecuación 2.8 correspondiente a una transición de circular a rectangular y la ecuación 2.9 para una transición de rectangular a circular.

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{2\sqrt{a_2 b_2 / \pi} - D_1}{2l_d} \rightarrow \alpha = 12.5^\circ \quad (2.8)$$

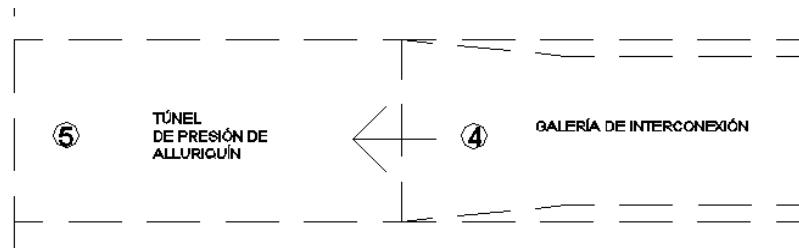
$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{D_5 - 2\sqrt{a_4 b_4 / \pi}}{2l_d} \rightarrow \alpha = 7.00^\circ \quad (2.9)$$

FIGURA No. 2.4: Esquema de la transición Túnel de Descarga Sarapullo - Galería de Interconexión.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 2.5: Esquema de la transición Galería de Interconexión - Túnel de Presión Alluriquín.

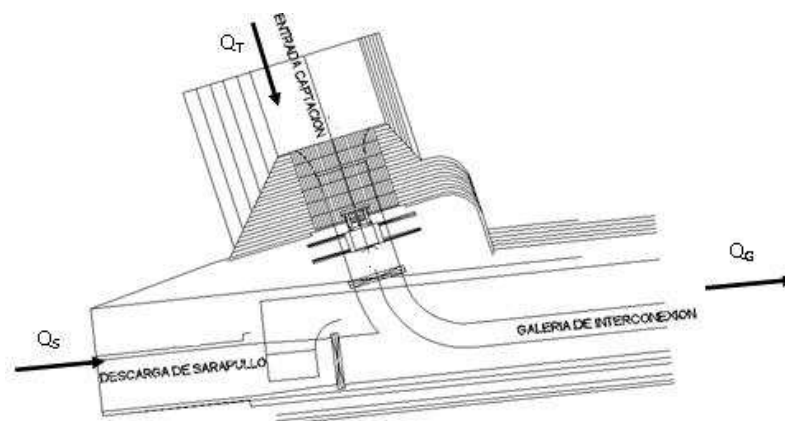


Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Si se toma como referencia el esquema de la Figura No. 2.6; los valores de éstos coeficientes se seleccionan con las siguientes definiciones:

Para la evaluación previa de los coeficientes de pérdida local en la estructura de unión (K_S , K_T , K_{GS} y K_{GT}), de los flujos provenientes de la chimenea de compensación Sarapullo y de la bocatoma de la presa Toachi, se utiliza la recomendación formulada por l'delchik, en el texto "*Handbook of Hydraulic Resistance*".

FIGURA No. 2.6: Esquema en planta de la Estructura de Unión Sarapullo – Toachi.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

$$K_{GS} = a_2 \left(\frac{Q_T}{Q_G} \right)^2 + b_2 \frac{Q_T}{Q_G} + c_2 \quad (2.10)$$

$$K_{GT} = a_1 \left(\frac{Q_T}{Q_G} \right)^2 + b_1 \frac{Q_T}{Q_G} + c_1 \quad (2.11)$$

$$K_S = \frac{K_{GS}}{\left(1 - \frac{Q_T}{Q_G} \right)^2 \left(\frac{A_G}{A_S} \right)^2} \quad (2.12)$$

$$K_T = \frac{K_{GT}}{\left(\frac{Q_T \cdot A_G}{Q_G \cdot A_T} \right)^2} \quad (2.13)$$

2.2 ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LOS FENÓMENOS DE SEPARACIÓN DE FLUJO, DE FORMACIÓN DE ZONAS DE REFLUJO, INTRODUCCIÓN DE AIRE Y DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN LA UNIÓN DE FLUJOS CON VELOCIDADES DIFERENTES.

2.2.1 SEPARACIÓN DE FLUJO – CAPA LÍMITE⁸

La turbulencia de la corriente se debe a intercambios transversales de partículas fluidas, es decir, de velocidades en el plano de la sección normal, que permiten una continua mezcla entre partículas. Este cambio de partículas es un permanente cambio entre las cantidades de movimiento.

2.2.1.1 La capa límite.-

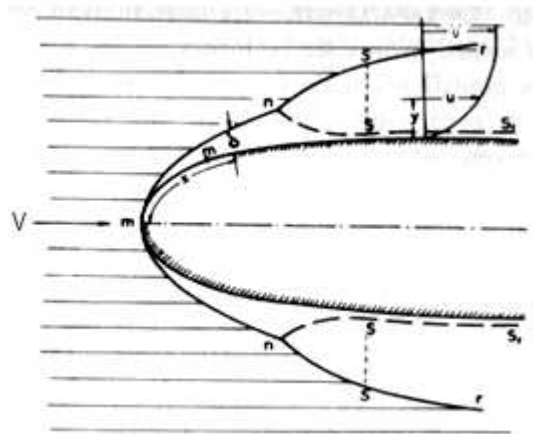
La capa límite representa una zona modificada debido a la presencia de un cuerpo o la variación brusca de la forma de los contornos en una corriente, ésta modificación se presenta en la zona cercana a la superficie del cuerpo y está caracterizada por la disminución de la velocidad de la corriente en esta zona. En ocasiones se presenta el fenómeno a la inversa, se comunica el movimiento del

⁸ “Hidráulica”, Domínguez F., Sexta Edición, Editorial Universitaria, 1999.

cuerpo al fluido en reposo, lo que quiere decir que el fluido cercano a la superficie del cuerpo es arrastrado por la traslación de éste.

En la Figura No. 2.7 se muestra el desarrollo de la capa límite, la cual queda entre la superficie del cuerpo y la línea "m, n, r," de la figura. En "m" comienza la capa límite sin espesor y sin velocidad, en las zonas cercanas de este punto el movimiento es ordenado o laminar.

FIGURA No. 2.7: Esquema del desarrollo de la capa límite.



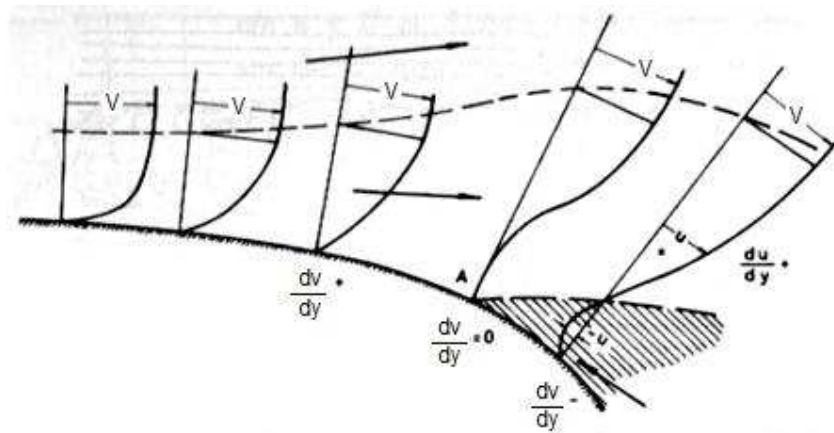
Fuente: "Hidráulica", Domínguez F., Sexta Edición, Editorial Universitaria, 1999.

A medida que se aleja de "m", llega un punto en que la zona de velocidad modificada no puede ser laminar y se hace turbulenta, representada en la figura como el punto "n".

En los cuerpos de gran curvatura, o simplemente en un contorno de la corriente con esas características, es posible que se produzca en la superficie de contorno un gradiente positivo de presión en el sentido de la corriente, lo que origina un gradiente inversa de velocidad que puede llegar a anularse. Donde la velocidad se anule, la capa límite se desprende de la pared originando lo que se denomina un despegue o separación. En la Figura No. 2.8, el despegue se produce en A, donde la derivada dv/dy se anula en la pared, y aguas abajo se hace negativa. Desde el punto de despegue, en la zona del despegue, sombreada en la Figura

No. 2.8, se produce un remolino con gran turbulencia y gran disipación de la energía de la corriente.

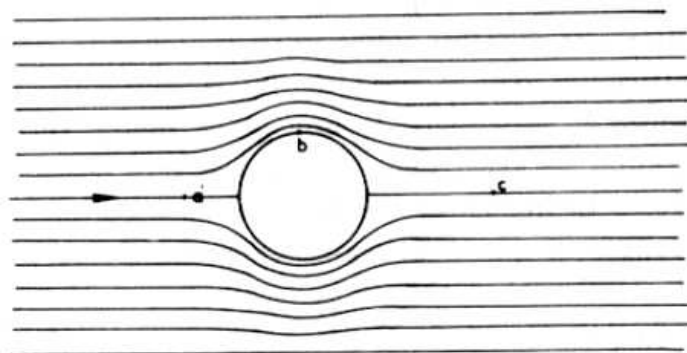
FIGURA No. 2.8: Desarrollo del desprendimiento de la capa límite (despegue).



Fuente: "Hidráulica", Domínguez F., Sexta Edición, Editorial Universitaria, 1999.

Si se considera, por ejemplo, una esfera inmóvil en una corriente de fluido perfecto, como éste es desprovisto de viscosidad y el movimiento tiene que ser irrotacional y estratificado, la separación es imposible, debido a que se desarrollo un gradiente negativo de presión entre "a" y "b" y uno positivo entre "b" y "c" de la Figura No. 2.9.

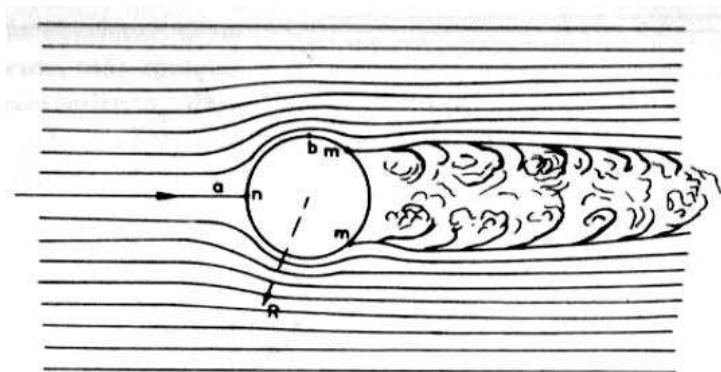
FIGURA No. 2.9: Desarrollo de la capa límite en un fluido perfecto.



Fuente: "Hidráulica", Domínguez F., Sexta Edición, Editorial Universitaria, 1999.

En cambio, si se trata de un fluido real, viscoso, desde b en la Figura No. 2.10, existiendo hacia aguas abajo, el gradiente positivo de presión (correlativo a uno negativo de velocidad), en m se produce el despegue seguido de una zona de remolinos o estela de separación, donde hay gran disipación de energía. Mientras mayor sea el número de Reynolds, más hacia aguas abajo se situará el punto m de despegue. En n la presión es máxima, punto donde comienza la capa límite, la cual crecerá de espesor hacia b, despegándose, como se dijo en m. Si la superficie de la esfera es rugosa aparece antes la capa límite turbulenta lo que hecha hacia aguas abajo el punto de separación. Si se produce la separación de la capa límite laminar, la estela de remolinos es relativamente mayor, y por lo tanto la pérdida de energía mayor también. La turbulencia favorece pues la unión de la capa límite al cuerpo, en cambio la estratificación anticipa la separación.

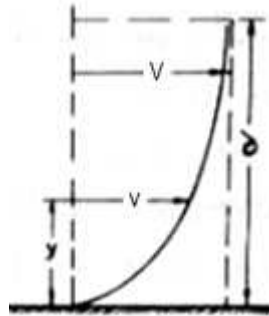
FIGURA No. 2.10: Desarrollo de la capa límite en un fluido real.



Fuente: "Hidráulica", Domínguez F., Sexta Edición, Editorial Universitaria, 1999.

La velocidad, nula en la pared misma, va creciendo hacia el interior de la corriente, tendiendo asintóticamente al valor de V como se muestre en la Figura No. 2.11.

FIGURA No. 2.11: Variación de la velocidad dentro de la capa límite.



Fuente: "Hidráulica", Domínguez F., Sexta Edición, Editorial Universitaria, 1999.

La velocidad V , se alcanza pues teóricamente solo a distancia infinita de la pared. Se define como δ , espesor de la capa límite, como la distancia a la pared en la cual se cumple con la relación $v/V = 0.99$. La disminución de la velocidad por efecto de la capa límite, equivale, para mantener el gasto de la corriente con la velocidad única U , a un desplazamiento de la pared de la placa hacia el interior de ella, de una altura δ^* tal, que se compensa.

Esta idea, puesta en ecuación dice:

$$V\delta^* = \int_0^{\delta} (V - v) dy \quad (2.14)$$

Lo que se ha llamado δ^* , se denomina espesor de desplazamiento. Se puede escribir:

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{v}{V}\right) dy \quad (2.15)$$

En la Figura No. 2.12, se muestra el desarrollo de la capa límite sobre una placa plana; se supone primeramente laminar, pues en el origen de la placa la velocidad es cero y el espesor es nulo también; empieza a crecer con x este espesor lentamente, con valores pequeñísimos de la velocidad. Si V , es como se ha dicho,

la velocidad común de todos los filetes de la corriente fuera de la zona modificada, dentro de la capa límite todas las velocidades son menores que V .

FIGURA No. 2.12: Desarrollo de la capa límite sobre una placa plana.



Fuente: "Hidráulica", Domínguez F., Sexta Edición, Editorial Universitaria, 1999.

Siguiendo los estudios de Prandtl⁹, se puede aceptar que la distribución de velocidades dentro de la capa límite laminar es:

$$v = V \left(\frac{3}{2} \frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \frac{y^3}{\delta^3} \right) \quad (2.16)$$

Se deduce que el espesor de la capa límite laminar δ es proporcional a la raíz de la distancia al comienzo:

$$\delta = \frac{4.65 \cdot \nu^{1/2}}{V^{1/2}} x^{1/2} \quad (2.17)$$

Se mencionó que cuando la capa límite laminar va tomando espesor es difícil que se mantenga con movimiento ordenado o laminar y se convierte en turbulenta, con aumento rápido de espesor.

⁹ Ludwig Prandtl, físico alemán, nacido en Freising, 4 de febrero de 1875 – †Gotinga, 15 de agosto de 1953, en sus estudios identificó la capa límite.

Para calcular el espesor de la capa límite turbulenta en paredes lisas, se utiliza:

$$\delta = \frac{0.26^{4/5} \cdot v^{1/5}}{V^{1/5}} x^{4/5} \quad (2.18)$$

Lo que muestra que el espesor de la capa límite turbulenta crece mucho más rápido con x , que el de la laminar.

En la capa límite turbulenta el espesor de desplazamiento (δ^*), toma un valor de $\delta^* = 0.125 \times \delta$, mientras que para la capa límite laminar $\delta^* = 0.375 \times \delta$.

2.3 SÍNTESIS DEL FENÓMENO DE RESISTENCIA AL FLUJO EN ESTRUCTURAS DE UNIÓN DE FLUJOS CON CAUDALES DIFERENTES Y DE ALTAS VELOCIDADES¹⁰.

A pesar de que existe gran cantidad de información experimental acerca del coeficiente de pérdidas en uniones de conductos en flujo incompresible, los datos más completos y fiables fueron obtenidos por Miller (1978). Sin embargo, posteriormente Idelchick (1996) también recopiló información acerca del coeficiente de pérdidas en flujo incompresible en diferentes elementos singulares, incluyendo uniones de conductos de diferentes geometrías.

En base a la información experimental, existen ecuaciones analíticas aproximadas que permiten estimar el coeficiente de pérdidas en flujo incompresible, tanto para uniones como bifurcaciones; pero las hipótesis simplificadoras empleadas en las mismas limitan el rango de aplicación para algunos tipos de flujo y relación de caudales entre ramas.

¹⁰“Estudio numérico y experimental del flujo compresible estacionario en uniones de conductos”, Pérez J., Universidad Politécnica de Cartagena, Octubre 2006.

Una definición que ha sido utilizada principalmente por Miller expresa el coeficiente de pérdidas como la diferencia de presión total entre las ramas aguas arriba y aguas abajo de la unión dividida entre la presión dinámica en la rama común, es decir:

$$K_{i(ud)} = \frac{\left(p_u + \frac{1}{2} \rho V_u^2 \right) - \left(p_d + \frac{1}{2} \rho V_d^2 \right)}{\frac{1}{2} \rho V_d^2} = \frac{p_{tu} - p_{td}}{\frac{1}{2} \rho V_d^2} \quad (2.19)$$

Donde:

$V_u \rightarrow$ velocidad característica aguas arriba de la unión.

$V_d \rightarrow$ velocidad característica de la rama común.

$p_u \rightarrow$ presión característica aguas arriba de la unión.

$p_d \rightarrow$ presión característica de la rama común

$p_{tu} \rightarrow$ presión total característica aguas arriba de la unión.

$p_{td} \rightarrow$ presión total característica de la rama común

2.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO EN UNIONES

El origen de las pérdidas energéticas que se producen en la unión de conductos se debe principalmente a uno o varios de los siguientes factores:

- Fricción viscosa del flujo con las paredes de la unión.
- Fricción viscosa entre flujos que interactúan y que poseen diferente energía cinética y cantidad de movimiento (unión de flujos).
- Desprendimiento de la capa límite interna y generación de regiones de flujo despegue que posteriormente se desarrolla y vuelve a adherirse a las paredes del conducto (zonas de separación).

CAPÍTULO 3

SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL

Como se mencionó en el capítulo anterior, se han realizado numerosas investigaciones experimentales acerca del coeficiente de pérdida en uniones y bifurcaciones de conductos en flujo incompresible. Muchos investigadores se han dedicado al estudio específico de este fenómeno y entre ellos los más destacados son D. S. Miller (1978) y I. E. Idelchik (1996), quienes recopilaron gran cantidad de datos propios y de otros autores acerca del coeficiente de pérdidas en flujo incompresible en diferentes elementos singulares, incluyendo uniones de conductos de diferentes geometrías y con una variedad de relaciones de caudales.

Estos autores presentan resultados y recomendaciones sobre la influencia del radio de redondeo de la intersección en los valores de coeficientes de pérdida tomando en consideración la relación de áreas transversales de los ramales, tanto para uniones como para bifurcaciones de flujos. Además, utilizaron los resultados experimentales para validar las ecuaciones analíticas propuestas por ellos y otros autores, y obtener así el coeficiente de pérdidas en cada una de las distribuciones de flujo.

3.1 ANÁLISIS DE LAS RELACIONES FUNCIONALES PROPUESTAS EN LA LITERATURA TÉCNICA.

3.1.1 RELACIONES FUNCIONALES PARA EL CÁLCULO DE COEFICIENTES DE PÉRDIDA EN UNIONES DE FLUJOS SEGÚN D. S. MILLER

En este numeral se presentan los coeficientes de pérdida para la combinación de dos flujos en uniones de conductos según D. S. Miller, quien toma como

parámetros geométricos importantes: las relaciones de áreas entre los conductos, el ángulo formado entre los dos conductos al momento de unirse y el radio de los chaflanes o aristas en la unión de los conductos. Los chaflanes en la unión de los conductos pueden ayudar a reducir ya sea uno o los dos coeficientes de pérdida de cada ramal. Las formas de las secciones transversales no tienen importancia, los valores para una sección circular puede ser aplicada sin serios errores a uniones con secciones transversales rectangulares y también uniones de conductos en los cuales tengamos diferentes secciones transversales en cada uno de los ramales¹¹.

D.S. Miller presenta los ábacos mostrados en el Anexo No. 2, con valores de coeficientes de pérdida para uniones de conductos de 45°, 60° y 90°, los cuales están en función tanto de las relaciones de caudales como de las relaciones de áreas de las secciones transversales de los conductos.

Mediante estos ábacos se determina los coeficientes de pérdidas en los dos ramales de la estructura de unión, tomándose en consideración únicamente aquellos valores para uniones a 60° y 90°, pese a que la estructura de unión Sarapullo – Toachi presenta un ángulo de 78.5°. Los Cuadros No. 3.1 y 3.2 muestran valores que representan la variación del coeficiente de pérdida para cada uno de los dos conductos que componen la estructura de unión, en función de las relaciones de caudales, para una relación de áreas de los conductos igual a 1 (Figuras Nos. 3.1 y 3.2).

CUADRO No. 3.1: Coeficientes de Pérdida k_{S-G} en función de la relación Q_T/Q_G para unión de conductos a 60° y 90°, a partir de los ábacos de D.S. Miller.

Valor de k_{S-G} ($A_T/A_G = 1$) según Miller, D.		
Q_T/Q_G	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
0.15	-	0.2
0.22	-	0.3

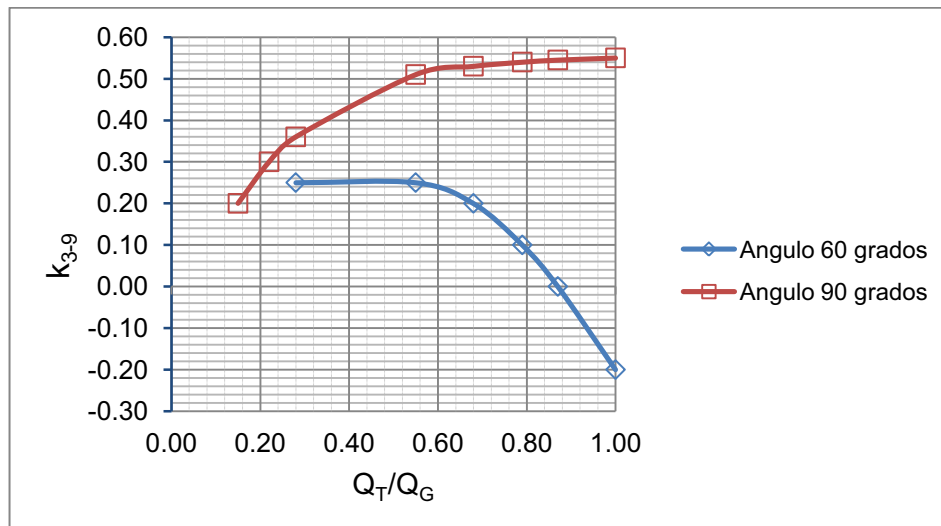
¹¹ "Discharge Characteristics", D.S. Miller, 1994, pág. 190,191

CUADRO No. 3.1: Continuación.

Valor de k_{S-G} ($A_T/A_G = 1$) según Miller, D.		
Q_T/Q_G	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
0.28	0.25	0.36
0.55	0.25	0.51
0.68	0.2	0.53
0.79	0.1	0.54
0.87	0	0.55
1	-0.2	0.55

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 3.1: Coeficientes de Pérdida k_{S-G} en función de la relación Q_T/Q_G para unión de conductos a 60° y 90° , a partir de los ábacos propuesto por D.S. Miller.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

CUADRO No. 3.2: Coeficientes de Pérdida k_{T-G} en función de la relación Q_T/Q_G para unión de conductos a 60° y 90° , a partir de los ábacos de D.S. Miller.

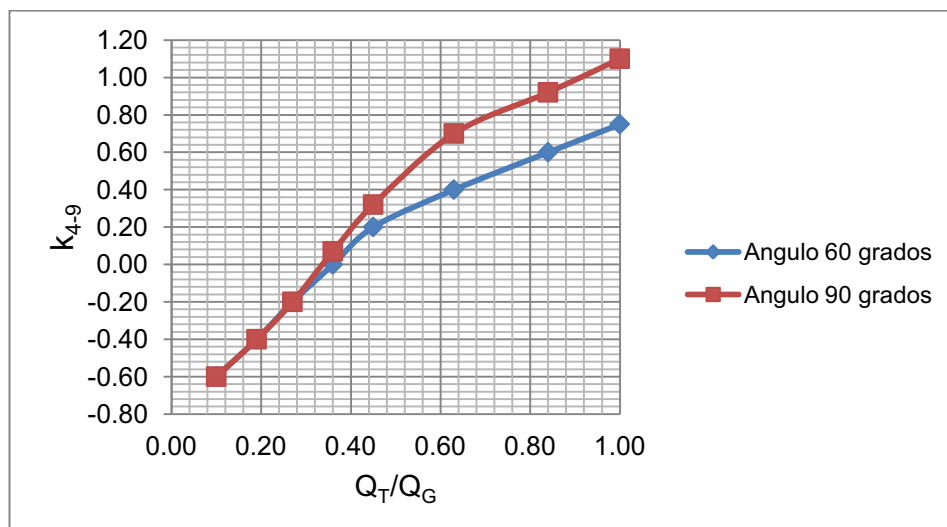
Valor de k_{T-G} ($A_T/A_G = 1$) según Miller, D.		
Q_4/Q_6	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
0.1	-0.6	-0.6
0.19	-0.4	-0.4
0.27	-0.2	-0.2

CUADRO No. 3.2: Continuación.

Valor de k_{T-G} ($A_T/A_G = 1$) según Miller, D.		
Q_4/Q_6	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
0.36	0	0.07
0.45	0.2	0.32
0.63	0.4	0.7
0.84	0.6	0.92
1	0.75	1.1

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 3.2: Coeficientes de Pérdida k_{T-G} en función de la relación Q_T/Q_G para unión de conductos a 60° y 90° , a partir de los ábacos propuesto por D.S. Miller.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

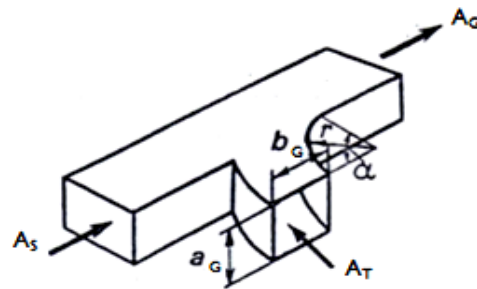
3.1.2 RELACIONES FUNCIONALES PARA EL CÁLCULO DE COEFICIENTES DE PÉRDIDA EN UNIONES DE FLUJOS SEGÚN I. E. IDELCHIK

I. E. Idelchik toma como parámetros fundamentales las relaciones de áreas entre los conductos, el ángulo formado entre los dos conductos al momento de unirse,

el radio de los chaflanes o aristas en la unión de los conductos y las relaciones de caudales que intervienen en el proceso de mezcla de los flujos¹².

En el manual de Idelchick se presenta el proceso para el cálculo de las pérdidas localizadas de diferentes estructuras de unión de flujos con dos o más ramales, pero en este caso en particular debido a la geometría planteada en los diseños originales se ha escogido el Diagrama 7 – 11 (Anexos No. 2), el cual se considera más apropiado para este caso. En la Figura No. 3.3 se presenta el esquema de la unión que se utiliza para el análisis.

FIGURA No. 3.3: Esquema de la Estructura de Unión en base al manual de Idelchik.



Fuente: ‘Handbook of Hydraulic Resistance’ I. E. IDELCHIK.

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

A continuación se presentan las ecuaciones planteadas para dicho cálculo:

$$K_{T-G} = a_1 \left(\frac{Q_T}{Q_G} \right)^2 + b_1 \frac{Q_T}{Q_G} + c_1 \quad (3.1)$$

$$K_{S-G} = a_2 \left(\frac{Q_T}{Q_G} \right)^2 + b_2 \frac{Q_T}{Q_G} + c_2 \quad (3.2)$$

$$K_{T.G} = \frac{K_{T-G}}{\left(\frac{Q_T \cdot A_G}{Q_G \cdot A_T} \right)^2} \quad (3.3)$$

¹² ‘Handbook of Hydraulic Resistance’, I. E. IDELCHIK.

$$K_{S,G} = \frac{K_{S-G}}{\left(1 - \frac{Q_T}{Q_G}\right)^2 \left(\frac{A_G}{A_S}\right)^2} \quad (3.4)$$

Los valores de los coeficientes a_1 , b_1 , c_1 , a_2 , b_2 y c_2 se encuentran tabulados en el “Handbook of Resistance” I. E. IDELCHIK, Diagrama 7 - 11.

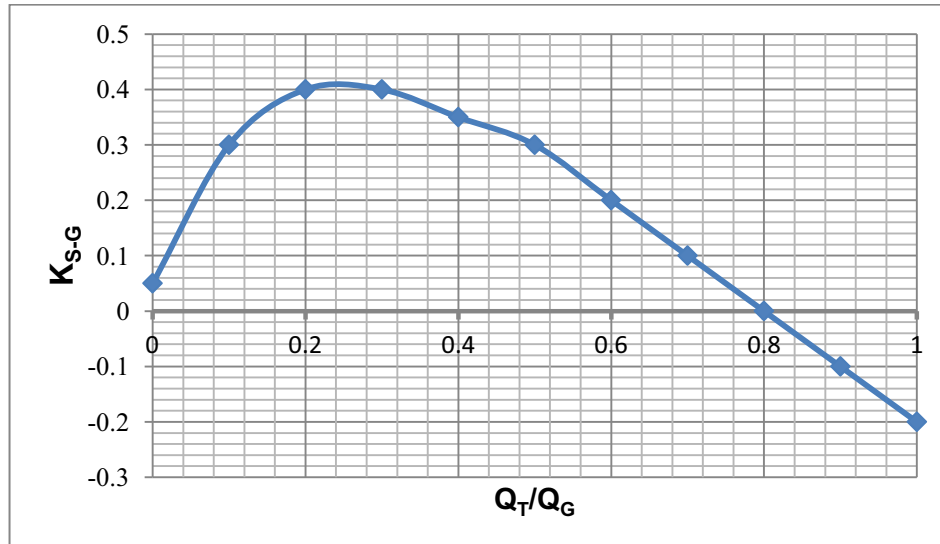
I. E. Idelchik también propone ábacos para obtener los coeficientes de pérdida en los dos ramales de la estructura de unión, estos ábacos se encuentran en función de la relación de caudales y de las relaciones de áreas de las secciones transversales de los conductos. Los Cuadros No. 3.3 y 3.4 representan la variación del coeficiente de pérdida para cada uno de los dos conductos que componen la estructura de unión en función de las relaciones de caudales, para una relación de áreas de los conductos igual a 1 (Figuras No. 3.4 y 3.5).

CUADRO No. 3.3: Coeficientes de Pérdida k_{S-G} en función de la Relación Q_T/Q_G para una relación de áreas igual a 1, a partir de los ábacos de I. E. Idelchik.

Q_T/Q_G	K_{S-G}
0	0.05
0.1	0.3
0.2	0.4
0.3	0.4
0.4	0.35
0.5	0.3
0.6	0.2
0.7	0.1
0.8	0
0.9	-0.1
1	-0.2

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 3.4: Coeficientes de Pérdida k_{S-G} en función de la Relación Q_T/Q_G para una relación de áreas igual a 1, a partir de los ábacos de I. E. Idelchik.



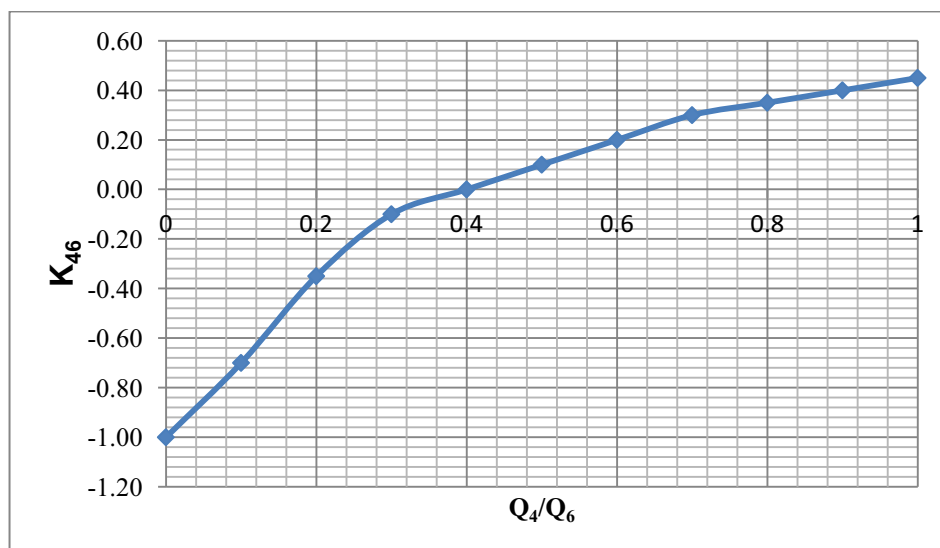
Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

CUADRO No. 3.4: Coeficientes de Pérdida k_{T-G} en función de la Relación Q_T/Q_G para una relación de áreas igual a 1, a partir de los ábacos de I. E. Idelchik.

Q_4/Q_5	K_{4-9}
0	-1
0.1	-0.7
0.2	-0.35
0.3	-0.1
0.4	0
0.5	0.1
0.6	0.2
0.7	0.3
0.8	0.35
0.9	0.4
1	0.45

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 3.5: Coeficientes de Pérdida k_{T-G} en función de la Relación Q_T/Q_G para una relación de áreas igual a 1, a partir de los ábacos de I. E. Idelchik.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

3.2 SÍNTESIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES EN COMPARACIÓN CON LA GEOMETRÍA PROPUESTA PARA LA UNIÓN SARAPULLO – TOACHI.

Con la geometría original de la estructura de unión Sarapullo – Toachi, se realizó un análisis numérico previo del comportamiento hidráulico de la estructura en base a la determinación del coeficiente de pérdida localizada para cada uno de los ramales en función de los escenarios de operación del sistema hidráulico¹³. En el Cuadro No. 3.5 se presenta los escenarios de funcionamiento del Sistema Hidráulico.

¹³ AH-RP-20 Funcionamiento hidráulico chimenea inferior Sarapullo-embalse Toachi, HIDROTOAPI E.P., Agosto 2010.

CUADRO No. 3.5: Escenarios de Funcionamiento de la Estructura de Unión Sarapullo – Toachi.

Escenario	Estructura	Qp	OBSERVACIONES
		(m ³ /s)	
1	Túnel Sarapullo	40.0	Trabajando tres turbinas en Sarapullo, funcionando tres turbinas con el caudal de diseño en Alluriquín
	Bocatoma Toachi	64.1	
	Galería Interconexión	104.1	
2	Túnel Sarapullo	6.0	Trabajando al 45% una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina al 45% en Alluriquín
	Bocatoma Toachi	13.1	
	Galería Interconexión	19.1	
3	Túnel Sarapullo	13.3	Trabajando una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina en Alluriquín
	Bocatoma Toachi	24.1	
	Galería Interconexión	37.5	
4	Túnel Sarapullo	26.7	Trabajando dos turbinas en Sarapullo, funcionando dos turbinas en Alluriquín
	Bocatoma Toachi	44.1	
	Galería Interconexión	70.8	
5	Túnel Sarapullo	6.0	Trabajando el 45% de una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina en Alluriquín
	Bocatoma Toachi	31.5	
	Galería Interconexión	37.5	
6	Túnel Sarapullo	13.3	Trabajando una turbina en Sarapullo, funcionando dos turbinas en Alluriquín
	Bocatoma Toachi	57.5	
	Galería Interconexión	70.8	
7	Túnel Sarapullo	26.7	Trabajando dos turbinas en Sarapullo, funcionando dos turbinas con el caudal de diseño y una tercera al 60%
	Bocatoma Toachi	64.1	
	Galería Interconexión	90.8	
8	Túnel Sarapullo	6.0	Trabajando al 45% una turbina en Sarapullo, funcionando tres turbinas en Alluriquín
	Bocatoma Toachi	98.1	
	Galería Interconexión	104.1	
9	Túnel Sarapullo	0.0	Funcionamiento de tres turbinas con el caudal de diseño, en Alluriquín (captado únicamente del embalse Toachi)
	Bocatoma Toachi	104.1	
	Galería Interconexión	104.1	

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

En el Cuadro No. 3.6 se presenta los resultados de los coeficientes de pérdidas en los ramales de la estructura de unión Sarapullo – Toachi obtenidos aplicando las relaciones propuestas por I.E. Idelchik para cada uno de los siete escenarios de funcionamiento.

CUADRO No. 3.6: Coeficientes de Pérdida k_{T-G} y k_{S-G} para unión de conductos a partir de las ecuaciones de I. E. Idelchik.

Escenario	k_{S-G}	k_{T-G}
1	0.678	0.753
2	0.233	0.735
3	0.545	0.752
4	0.647	0.754
5	-5.421	0.603
6	-3.096	0.632
7	0.018	0.723

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

3.2.1 EJEMPLO DE APLICACIÓN: COEFICIENTE DE PÉRDIDA DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO – TOACHI.

El presente ejemplo hace visible la aplicación del coeficiente de pérdida de la estructura de unión Sarapullo – Toachi en la determinación del valor de pérdida de energía que se produce en la confluencia de los dos flujos.

El análisis del flujo se lo realiza desde la chimenea de equilibrio inferior de la Casa de Máquinas Sarapullo hasta la galería de interconexión, incluyendo el túnel de descarga Sarapullo y la estructura de interconexión, donde se unen el caudal captado por la bocatoma de la presa Toachi y el caudal turbinado de la Central Sarapullo.

En los numerales siguientes se indica el procedimiento de cálculo, en forma resumida, para el Escenario 1 (Cuadro 3.7), tomando como base los coeficientes de pérdidas obtenidos a partir de las ecuaciones propuestas en el libro “Handbook of Hydraulic Resistance” I. E. Idelchik.

CUADRO No. 3.7: Valores de caudales del Escenario 1.

Escenario	Tramo	Q_p	Q_m	OBSERVACIONES
		(m^3/s)	(lt/s)	
1	Sarapullo (Q_S)	40.0	22.4	Trabajando tres turbinas en Sarapullo, funcionando tres turbinas con el caudal de diseño en Alluriquín
	Toachi (Q_T)	64.1	35.9	
	Galería (Q_G)	104.1	58.2	

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

3.2.1.1 Pérdidas por fricción en Prototipo.

En base a las Ecuaciones 2.4 y 2.5 se obtuvieron los valores de las pérdidas de energía debidos a la fricción, y estos valores se muestran en el Cuadro No. 3.8.

CUADRO No. 3.8: Valores de pérdida por fricción en los tramos Túnel de descarga Sarapullo y Galería de Interconexión.

Tramo	R_h (m^2/m)	Longitud (m)	V (m/s)	Re	ϵ^{14} m	λ	Δh_f (m)
Túnel Sarapullo	0.95	470.00	3.53	1.2E+07	0.001	0.0146	1.14
Galería de Interconexión	1.08	80.19	5.31	2.0E+07	0.001	0.0142	0.38

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

3.2.1.2 Pérdidas Localizadas en Modelo.

Las pérdidas de energía local se calculan en base a los valores de los coeficientes de pérdida obtenidos de la literatura técnica y se muestran en el Cuadro No. 3.9.

¹⁴ "Hidráulica General", G. Sotelo, Editorial LIMUSA, 1997.

CUADRO No. 3.9: Valores de pérdida localizada en base a literatura técnica: Estructura de Unión y Transición (Idelchik), Bocatoma (Bureau), Rejilla (Sotelo).

Estructura	K	A(m²)	Q (m³/s)	Δhf (m)
Entrada Bocatoma Presa Toachi	0.28	19.6	64.1	0.15
Rejilla	0.65	13.7	64.1	0.72
Transición Túnel - Galería	0.18	11.3	40.0	0.11
Sarapullo – Galería	0.68	19.6	40.0	0.14
Toachi – Galería	0.75	19.6	64.1	0.41

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Se presentan los niveles de energía tanto del tramo correspondiente al Túnel de Descarga Sarapullo hacia el final la Galería de Interconexión, como del tramo desde la Bocatoma del Embalse de la Presa Toachi hacia el final de la Galería de Interconexión.

3.2.1.3 Tramo Túnel de Descarga Sarapullo – Galería de Interconexión

En este tramo se toma en cuenta las pérdidas por fricción producidas en el túnel de descarga Sarapullo y la galería de Interconexión, así como también las pérdidas localizadas generadas en la estructura de unión correspondiente al ramal Túnel de Descarga Sarapullo – Galería de Interconexión. Los niveles de energía obtenidos se presentan en el Cuadro No. 3.10.

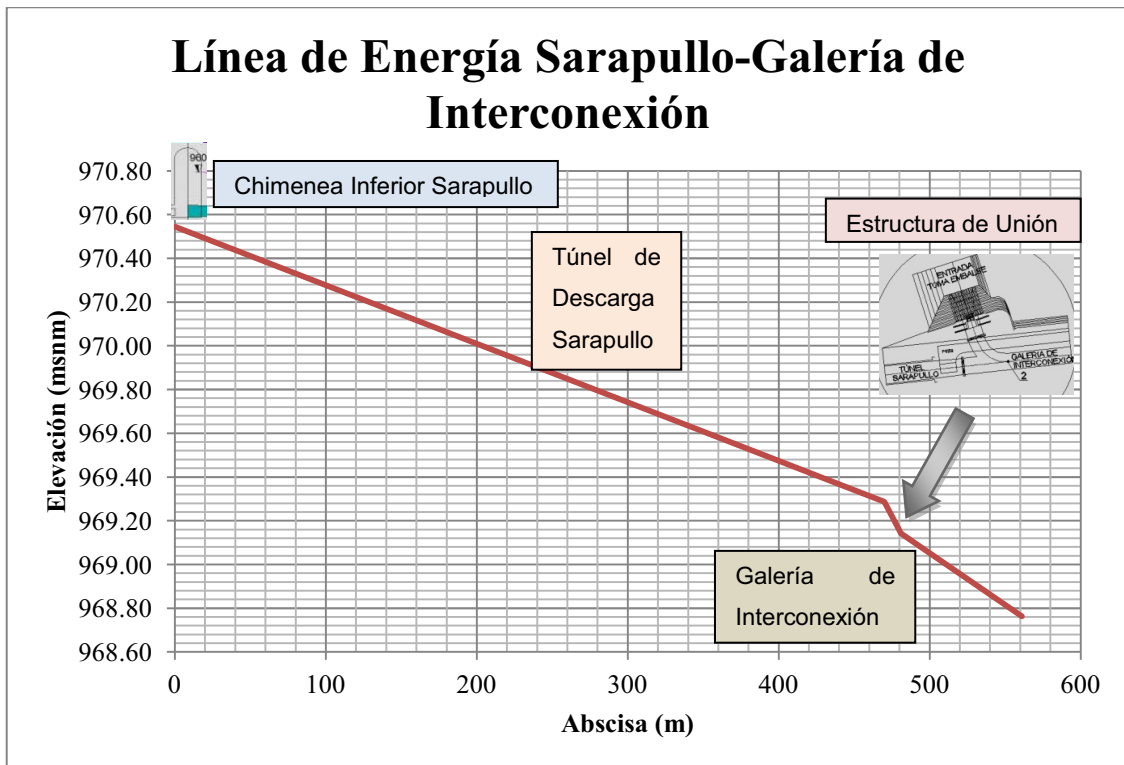
CUADRO No. 3.10: Niveles de energía en el tramo túnel de descarga Sarapullo - Galería de Interconexión.

Punto	Abscisa (m)	Nivel Energía (msnm)
Entrada Túnel de Descarga Sarapullo	0.00	970.55
Inicio Estructura de Unión	470.00	969.29
Salida Estructura de Unión	481.00	969.14
Final Galería de Interconexión	561.19	968.76

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

En la Figura No. 3.6 se indica la variación del nivel de energía en este tramo con respecto a la abscisa.

FIGURA No. 3.6: Niveles de energía en el tramo túnel de descarga Sarapullo - Galería de Interconexión.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

3.2.1.4 Tramo Bocatoma Embalse Toachi – Galería de Interconexión

Al igual que en el tramo descrito en el numeral anterior, en este tramo se toma en cuenta tanto las pérdidas por fricción producidas en la galería de Interconexión como las pérdidas localizadas generadas en la bocatoma del embalse Toachi y en la estructura de unión correspondiente al ramal Bocatoma Embalse Toachi – Galería de Interconexión. Los niveles de energía se presentan en el Cuadro No. 3.11.

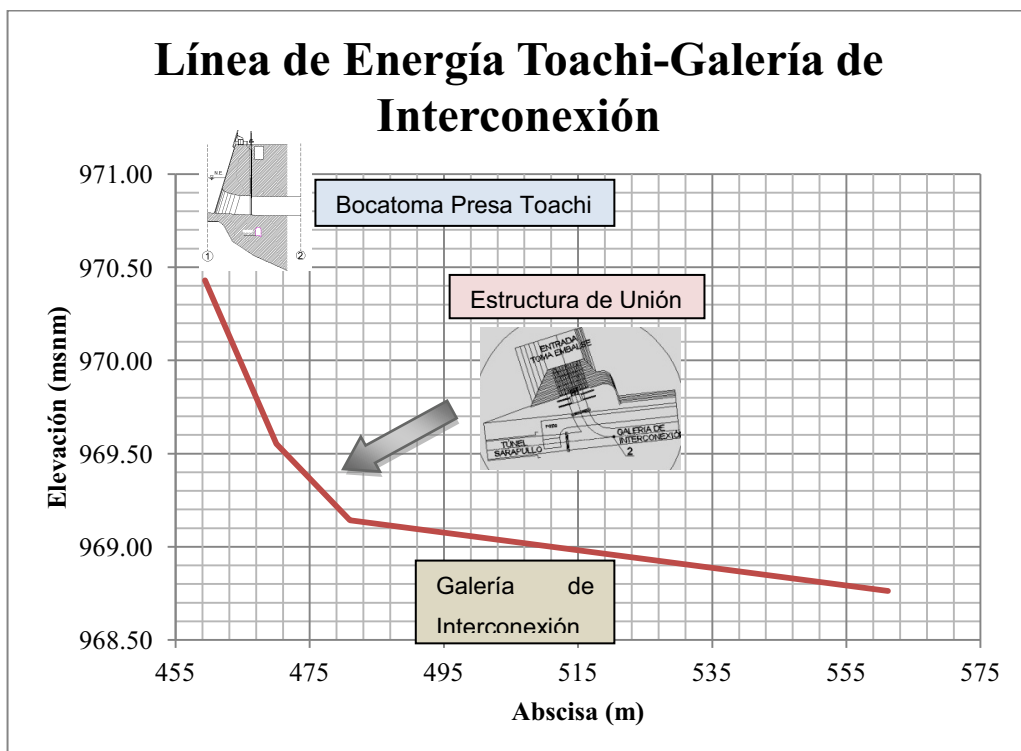
CUADRO No. 3.11: Niveles de energía experimentales en el tramo: Bocatoma de la presa Toachi-final de Galería de Interconexión.

Punto	Abscisa (m)	Nivel Energía (msnm)
Bocatoma embalse Toachi	459.40	970.43
Inicio Estructura de Unión	470.00	969.55
Salida Estructura de Unión	481.00	969.14
Final Galería de Interconexión	561.19	968.76

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

La Figura No. 3.7 indica la variación del nivel de energía en este tramo con respecto a la abscisa.

FIGURA No. 3.7: Niveles de energía experimentales en el tramo: Bocatoma de la presa Toachi-final de Galería de Interconexión.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

El coeficiente de pérdida localizada de la Estructura de Unión Sarapullo - Toachi es útil para determinar de manera más acertada la carga que se va a tener para la producción de energía eléctrica en la Central Alluriquín.

3.3 CONCLUSIONES.

Existen varias formas de estimación del coeficiente de pérdida en flujo incompresible, tales como ábacos y ecuaciones analíticas aproximadas, aplicadas tanto para uniones de geometría simple como compleja; y, también para uniones y casos de bifurcación de flujos. Sin embargo, debido a las hipótesis simplificadoras que deben considerarse, su validez es limitada para algunos tipos de flujo y relación de caudales entre ramales.

La aplicación de las fórmulas de los manuales técnicos trae consigo incertidumbre acerca de los resultados obtenidos, debido a su limitado rango de aplicación. Es por eso hacer uso de la modelación física, con la cual se obtiene valores experimentales de coeficientes válidos para la forma y sección del diseño original.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FENÓMENO FÍSICO

4.1 INTRODUCCIÓN: BASES DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL PROBLEMA Y CRITERIO DE SIMILITUD DINÁMICA REQUERIDA.

El análisis dimensional se refiere a las relaciones matemáticas de las magnitudes físicas que intervienen en un fenómeno y constituye una importante herramienta para el análisis de la mecánica de fluidos y otras ramas de la ingeniería.

En toda ecuación que exprese una relación física entre magnitudes debe verificarse la igualdad dimensional de la misma. En general, todas las relaciones físicas pueden reducirse a una relación entre las magnitudes fundamentales, fuerza [F], longitud [L] y tiempo [T] o bien la masa [M], longitud [L] y el tiempo [T].

Los modelos hidráulicos son modelos físicos para la simulación de los estados, fenómenos o procesos relacionados con el flujo y pueden ser concebidos como modelos sin distorsión o modelos distorsionados.

Los modelos sin distorsión tienen todas las características significativas del prototipo reproducidas a escala (semejanza geométrica) y satisfacen todas las restricciones de diseño (semejanza cinemática y dinámica).

El estudio en modelo hidráulico de una estructura en particular exige que se cumplan al mismo tiempo las siguientes similitudes:

- Geométrica: Longitudes, áreas y volúmenes con sus formas.
- Cinemática. Tiempos, velocidades, aceleraciones, caudales.
- Dinámica: Masas, fuerzas, presiones, pesos específicos, cantidades de movimiento, energías, tensiones superficiales, densidades, viscosidades.

4.1.1 SIMILITUD GEOMÉTRICA

La similitud geométrica consiste en la definición de formas y dimensiones homólogas entre prototipo y modelo, que implica una relación constante, es decir que, para cualquier longitud L resulta:

$$e_L = \frac{L_p}{L_m}$$

Donde:

L_p : Longitud en prototipo.

L_m : Longitud en modelo.

e_L : Escala de longitudes.

4.1.2 SIMILITUD CINEMÁTICA

La similitud cinemática en un modelo hidráulico se cumple cuando, comparando los sistemas prototipo y modelo, la forma de los patrones de flujo homólogos son iguales en cualquier tiempo, dando lugar a que la relación de velocidades de puntos homólogos sea constante:

$$e_v = \frac{V_p}{V_m}$$

Donde:

V_p : Velocidad en prototipo.

V_m : Velocidad en modelo.

e_v : Escala de velocidades.

4.1.3 SIMILITUD DINÁMICA

La similitud dinámica se logra cuando las fuerzas que actúan sobre puntos homólogos son similares, lo que implica una relación constante en todo el sistema:

$$e_F = \rho_r \cdot e_L^2 \cdot e_V^2$$

Donde:

ρ_r : Escala de densidades, si el fluido es el mismo en modelo y en prototipo, esta relación es igual a 1.

e_L : Escala de longitudes.

e_V : Escala de velocidades.

e_F : Escala de fuerzas.

Para tener una sola escala de fuerzas es necesario que los polígonos de fuerzas, para los elementos de masa correspondientes, sean geoméricamente semejantes.¹⁵ Por lo cual es necesario simplificar dicho polígono, ignorando las componentes menos importantes.

De todas maneras existen fenómenos de importancia secundaria que en el modelo no pueden ser simulados en forma exacta. Esta aparente limitación en la técnica de modelación hidráulica se conoce como: “efectos de escala”, y marca diferencias entre los resultados de modelo con el comportamiento real de prototipo. El análisis de los efectos de escala es de igual manera parte importante en la realización de los ensayos experimentales en laboratorio.

¹⁵ “Dinámica de los Fluidos”; Daily J.; Editorial F. Trillas, S.A.; Pág. 166

4.2 RELACIÓN FUNCIONAL TEÓRICA Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES.

Dentro de la investigación se debe comprobar que para cualquier escenario, el número de Reynolds en el modelo (Re_m) sea suficientemente grande, Re_m mayor a 2×10^4 ¹⁶, como para alcanzar un régimen turbulento totalmente desarrollado y garantizar que la resistencia al movimiento del agua y los puntos o zonas de separación del flujo principal sean debidamente representados en el modelo.

De igual manera, el valor del coeficiente de pérdida de energía por fricción en modelo (λ_m) debe mantenerse similar al valor del coeficiente de prototipo (λ_p), es decir, se debe garantizar la misma pendiente en la línea piezométrica y la línea de energía en los tramos cortos de las conducciones tanto en el modelo como en el prototipo.

Con la ecuación [4.1], se evalúa el número de Reynolds en los tramos del Túnel de Descarga Sarapullo y de la Galería de Interconexión para una gama de caudales seleccionados y bajo la hipótesis de flujo normal permanente en el prototipo y modelo.

$$Re = \frac{V \cdot 4 \cdot R_h}{\nu} \quad (4.1)$$

Donde:

ν : Viscosidad Cinemática, que a una temperatura ambiente de 15°C toma el valor de $1.14E-06$ m²/s.

Para el cálculo del coeficiente de fricción de prototipo (λ_p) y modelo (λ_m), se utiliza la relación de Colebrook – White, aplicable para contorno liso y rugoso.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/R_h}{3.71} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad (4.2)$$

¹⁶ “Mecánica de Fluidos”, Streeter V., Mc Graw Hill, Novena Edición, 2000.

La selección del material adecuado para la construcción del modelo se realiza a través del cálculo del coeficiente de pérdida de las diferentes estructuras tanto para el prototipo como para el modelo, para lo que se procede a la determinación de un coeficiente de fricción en función de un valor impuesto de la rugosidad absoluta (ϵ) y a su vez se comprueba si el coeficiente de fricción calculado corresponde al del material elegido a través de la determinación del coeficiente de Manning usando la ecuación 4.6, que resulta de igualar las ecuaciones 4.3 y 4.4 (ecuaciones para el cálculo de la velocidad según Darcy – Weisbach y Manning respectivamente)

$$V = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} R_h^{\frac{1}{2}} I e^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} I e^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

$$\lambda = \frac{8g \cdot n^2}{R_h^{\frac{1}{3}}} \quad (4.5)$$

$$n = \sqrt{\frac{\lambda \cdot R_h^{\frac{1}{3}}}{8g}} \quad (4.6)$$

Se establece un valor de $\epsilon_m = 0.0015$ mm para modelo y un valor de $\epsilon_p = 2$ mm para prototipo¹⁷. Los valores calculados de coeficiente de fricción (λ) y de coeficiente de Manning (n), tanto para prototipo como para modelo, se muestran en los Cuadros No. 4.1 y 4.2, respectivamente.

CUADRO No 4.1: Secciones prototipo y valores obtenidos de λ_p y n_p .

TRAMO	Secciones			A m ²	Rh m
	a	b	φ		
	m	m	m		
Túnel de Descarga Sarapullo	-	-	3.80	11.34	0.95
Galería de Interconexión	3.50	5.60	-	19.60	1.08

¹⁷ "Hidráulica General", Sotelo A., Volumen I, Editorial LIMUSA S.A. Sexta edición, México, 1982.

CUADRO No 4.1: Continuación.

Escenario	Túnel de Descarga Sarapullo					
	Q	V	$\epsilon/(4R_h)$	Re_p	λ_p	n_p
	m^3/s	m/s				
1	40.0	3.5	5.26E-04	1.2E+07	0.0169	0.015
2	6.0	0.5		1.8E+06	0.0172	0.015
3	13.3	1.2		3.9E+06	0.0170	0.015
4	26.7	2.4		7.8E+06	0.0169	0.015
5	6.0	0.5		1.8E+06	0.0172	0.015
6	13.3	1.2		3.9E+06	0.0170	0.015
7	26.7	2.4		7.8E+06	0.0169	0.015
PROMEDIO					0.0170	0.015

Escenario	Galería de Interconexión					
	Q	V	$\epsilon/(4R_h)$	Re_p	λ_p	n_p
	m^3/s	m/s				
1	104.1	5.3	4.64E-04	2.0E+07	0.0164	0.015
2	19.1	1.0		3.7E+06	0.0166	0.015
3	37.5	1.9		7.2E+06	0.0165	0.015
4	70.8	3.6		1.4E+07	0.0165	0.015
5	37.5	1.9		7.2E+06	0.0165	0.015
6	70.8	3.6		1.4E+07	0.0165	0.015
7	90.8	4.6		1.8E+07	0.0164	0.015
PROMEDIO					0.0165	0.015

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

CUADRO No 4.2: Secciones de modelo y valores obtenidos de λ_m y n_m .

TRAMO	Secciones			A m^2	Rh m
	a	b	ϕ		
	m	m	m		
Túnel de Descarga Sarapullo	-	-	0.19	0.03	0.048
Galería de Interconexión	0.18	0.28	-	0.05	0.054

Escenario	Túnel de Descarga Sarapullo					
	Q	V	$\epsilon/(4R_h)$	Re_m	λ_m	n_m
	l/s	m/s				
1	22.4	0.8	7.89E-06	1.3E+05	0.0171	0.009
2	3.4	0.1		2.0E+04	0.0260	0.011
3	7.5	0.3		4.4E+04	0.0260	0.011
4	14.9	0.5		8.8E+04	0.0260	0.011
5	3.4	0.1		2.0E+04	0.0260	0.011
6	7.5	0.3		4.4E+04	0.0260	0.011
7	14.9	0.5		8.8E+04	0.0260	0.011
PROMEDIO					0.0247	0.011

CUADRO No 4.2: Continuación.

Escenario	Galería de Interconexión					
	Q	V	$\epsilon/(4R_h)$	Re_m	λ_m	n_m
	l/s	m/s				
1	58.2	1.2	6.96E-06	2.2E+05	0.0154	0.009
2	10.7	0.2		4.1E+04	0.0218	0.010
3	20.9	0.4		8.1E+04	0.0189	0.010
4	39.6	0.8		1.5E+05	0.0165	0.009
5	20.9	0.4		8.1E+04	0.0189	0.010
6	39.6	0.8		1.5E+05	0.0165	0.009
7	50.8	1.0		2.0E+05	0.0158	0.009
PROMEDIO					0.0177	0.009

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Los valores obtenidos de número de Reynolds son mayores o muy cercanos al valor de 2×10^4 , mostrados en los cuadros anteriores, lo que indica que el flujo es turbulento totalmente desarrollado, es decir, que dentro del flujo predominan las fuerzas de inercia, mientras que las fuerza viscosas pueden ser despreciadas.

4.3 RELACIÓN FUNCIONAL RESTRINGIDA Y FORMULACIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.

4.3.1 SIMILITUD DINÁMICA REQUERIDA

El presente estudio se refiere al flujo a través de una estructura de interconexión con flujo a presión, con un flujo de velocidad relativamente baja, en el cual predominan las fuerzas de presión y de inercia. Es decir, la incidencia de las fuerzas de viscosidad (resistencia al movimiento y separación de flujo) debe mantenerse relativamente pequeña; así como el efecto de las fuerzas de elasticidad / compresibilidad del agua (tránsito de ondas presión), de la tensión superficial y de la presión de vapor (cavitación) se debe mantener despreciable.

Tomando como referencia todo lo anterior, el criterio de similitud seleccionado corresponde al Criterio según Euler¹⁸.

Para garantizar que la incidencia relativa de estas fuerzas está debidamente representada en el modelo, se requiere que el valor del número de Euler, correspondiente al modelo debe ser igual a aquél que se tiene en el prototipo o en la naturaleza.

El número de Euler es la relación entre las fuerzas inerciales con las fuerzas de presión.

$$Eu = \frac{P}{\rho \cdot V^2} \quad (4.7)$$

En trabajos de orden práctico se puede expresar como¹⁹:

$$Eu = \frac{V}{\sqrt{2p/\rho}} \quad (4.8)$$

Este parámetro toma gran importancia en fenómenos de flujo ocasionados por un gradiente de presiones donde la densidad y la aceleración del fluido intervienen primordialmente en el fenómeno y las fuerzas viscosas pierden importancia; es decir, el movimiento depende de la forma del flujo (geometría), con una configuración prácticamente invariable de las líneas de corriente. Principalmente estos problemas de flujo se presentan en estructuras como túneles, tuberías, orificio, válvulas, compuertas, etc.

4.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Para el modelo en estudio se aplica la Similitud Dinámica de Euler, debido a que las condiciones predominantes son las fuerzas de presión, ya que se maneja un

¹⁸ "Teoría de modelos hidráulicos", Castro M., Apuntes de Clase, Postgrado en Recursos Hídricos, 2009.

¹⁹ "Teoría de modelos hidráulicos", Castro M., Apuntes de Clase, Postgrado en Recursos Hídricos, 2009.

modelo con flujo a presión; y viscosas, debido a que se trabaja con un flujo turbulento totalmente desarrollado en base al número de Reynolds con los diferentes escenarios analizados ($Re > 2 \times 10^4$).

La fórmula de Colebrook White es aplicada para obtener el coeficiente de fricción ya que se ajusta muy bien a las condiciones tanto para el modelo y como para el prototipo, porque es válida tanto para tubos lisos y rugosos en la zona de transición o turbulenta con un número de Reynolds mayor a 4×10^3 .

Se concluye que el material a utilizar en la construcción del modelo es el acrílico, una vez realizado un análisis con varios materiales, utilizando para la tabulación de los cálculos tanto la rugosidad absoluta (ϵ) como el número de Manning correspondiente a cada material.

CAPÍTULO 5

DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO FÍSICO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN

5.1 DISEÑO DEL MODELO HIDRÁULICO FÍSICO: ESCALAS E IMPLANTACIÓN EN EL LABORATORIO.

De la información técnica que fue entregada por HIDROTOAPI E.P. a la Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental para el dimensionamiento hidráulico de las obras que forman parte del modelo de la estructura de unión Sarapullo – Toachi, se tomó como referencia los planos de detalle que se indican en el Cuadro No. 5.1.

CUADRO No. 5.1: Planos de detalle para el dimensionamiento hidráulico de la Estructura de Unión Sarapullo – Toachi.

Código	Registro	Descripción
PG-GEN-003	6526.0-P-103	Arreglo general - Esquema Hidráulico - Perfil
PS-CMS-010	6526.0-P-1307	Chimenea de Equilibrio Inferior - Planta y cortes
PS-CMS-012	6526.0-P-1314	Túnel de descarga - Planimetría general, Perfil longitudinal y cortes típicos
TA-PTO-003	6526.0-P-2103	Presa - Planta
TA-PTO-004	6526.0-P-2104	Presa - Vista desde aguas arriba
TA-PTO-005	6526.0-P-2105	Presa - Vista desde aguas abajo
TA-PTO-017	6526.0-P-2111	Canal de toma - Planta
TA-PTO-018	6526.0-P-2112	Canal de toma - Cortes
TA-TPA-001	6526.0-P-2201	Arreglo general - Planta, Perfil y Cortes típicos

Fuente: 6526.0-R-10 Lista de Planos, HIDROTOAPI E.P., 2010.

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

5.1.1 SELECCIÓN DE ESCALA

Dentro de la modelación física, un elemento importante constituye la selección de la escala geométrica de la estructura, o lo que es lo mismo la escala de longitudes, para lo cual se toma en cuenta factores como:

1. Criterio de similitud adoptado para el modelo.
2. Disponibilidad de espacio físico; ventajas y restricciones de las instalaciones del laboratorio.
3. Posibilidad de analizar la introducción de aire.
4. Facilidad de realizar mediciones de las magnitudes físicas con precisión.

Se realizó un análisis comparativo de diferentes escalas para el modelo, mostrado en el Cuadro No. 5.2, donde se presentan las características representativas involucradas en el modelo.

CUADRO No. 5.2: Análisis comparativo entre diferentes escalas para el modelo.

	ESCALA MODELO				
	1:50	1:40	1:30	1:25	1:20
DIMENSIONES					
<i>Túnel de Descarga Sarapullo</i>					
Diámetro (m)	0.08	0.1	0.13	0.15	0.19
<i>Galería de Interconexión</i>					
Ancho (m)	0.07	0.09	0.12	0.14	0.18
Altura (m)	0.11	0.14	0.19	0.22	0.28
<i>Entrada Toma Toachi</i>					
Ancho (m)	0.12	0.14	0.19	0.23	0.29
Altura (m)	0.16	0.2	0.26	0.31	0.39
Caudales					
Q_T (l/s)	5.89	10.29	21.13	33.32	58.22
Q_S (l/s)	2.26	3.95	8.11	12.8	22.36
Q_G (l/s)	5.89	10.29	21.13	33.32	58.22
Q_{min} (l/s)	0.34	0.59	1.22	1.92	3.35
Velocidades					
V_T (m/s)	0.33	0.36	0.42	0.46	0.52
V_S (m/s)	0.5	0.56	0.64	0.71	0.79
V_G (m/s)	0.75	0.84	0.97	1.06	1.19
V_{min} (m/s)	0.04	0.08	0.16	0.24	0.43

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Como se muestra en el cuadro anterior, los valores de caudales para las escalas 1:50, 1:40, 1:30 y 1:25 son pequeños como para tener una buena precisión durante el funcionamiento del modelo. Así mismo conducen a que el número de Reynolds en el modelo sea inferior a 2×10^4 y la precisión en la medida de las magnitudes de niveles de energía total y de presión entre dos puntos vecinos, llegaría a ser del orden de 1 mm, lo cual sería inadecuado.

Por lo expuesto anteriormente se establece como la mejor opción la escala de longitudes 1:20. En el Cuadro No. 5.3 se presentan las principales características del modelo y las magnitudes derivadas para la modelación hidráulica del fenómeno de flujo.

CUADRO No. 5.3: Características del modelo a escala 1:20

MAGNITUD	MODELO A ESCALA 1:20				
	Símbolo	Equivalencia	Valor numérico	Valor (prototipo)	Valor (modelo)
Longitud	e_L	e_L	20	1 m	5 cm
Caudal	e_Q	$(e_L)^{5/2}$	1788.85	100 m ³ /s	55.9 l/s
Velocidad	e_V	$(e_L)^{1/2}$	4.47	2 m/s	0.45 m/s
Altura de presión	e_P	e_L	20	10 m	50 cm
Tiempo	e_T	$(e_L)^{1/2}$	4.47	1 h	13.4 min
Fuerza	e_F	$(e_L)^3$	8000	1 T	0.13 Kg
Altura de energía	e_E	e_L	20	10 m	50 cm

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

5.2 JUSTIFICACIÓN DE LA ESCALA DEL MODELO FÍSICO

5.2.1 CRITERIO DE SIMILITUD ADOPTADO PARA EL MODELO Y ESCALAS DE LAS DIFERENTES MAGNITUDES DERIVADAS EN LA INVESTIGACIÓN ($RE > 2 \times 10^4$)

La principal condición en el proceso de selección de escala es el criterio de similitud adoptada para el modelo hidráulico. Para este caso particular se “utiliza” la similitud según Euler, debido a que las fuerzas predominantes que actúan

sobre el flujo son las de presión y de inercia. Sin embargo se debe garantizar que el valor del número de Reynolds sea lo suficientemente grande ($Re > 2 \times 10^4$) para tener un flujo turbulento totalmente desarrollado y garantizar su respectiva analogía con el flujo del prototipo.

De tal manera el valor del número de Reynolds, más bajo obtenido es en el Túnel Sarapullo, el cual se aproxima a 2×10^4 número de Reynolds lo cual satisface la condición de similitud planteada.

5.2.2 DISPONIBILIDAD DE ESPACIO FÍSICO, CONDICIONES EN EL LABORATORIO

Se ha procurado escoger el modelo de mayor tamaño, que pueda ser construido en el laboratorio del CIERHI - EPN, tomando en cuenta las disponibilidades físicas de espacio, de caudales y simultáneamente, de la carga hidráulica desde el inicio del modelo.

5.2.3 POSIBILIDAD DE ANALIZAR LA INTRODUCCIÓN DE AIRE

En modelación hidráulica, los fenómenos de introducción de aire podrán ser representados y medidos adecuadamente a partir de una escala que permita la formación de las burbujas de aire y que admita la visualización de dichos fenómenos. En la literatura técnica^{20 21 22}, se menciona que la escala de longitudes para un modelo de este tipo será igual o mayor a $e_L = 20$.

²⁰ "Hydraulic Modelling", H.Kobus, DVWW, Mitteilungsheft No. 4, 1978.

²¹ "Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures", Kobus, H. (Ed.), Esslingen am Neckar, Alemania, 1984, International Association for Hydraulic Research (IAHR), Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK).

²² "Análisis Dimensional y Modelación Física en Hidráulica", Castro, M. – Richter, A., Seminario EPN, 1990.

En el Cuadro No. 5.4 se observan las principales dimensiones geométricas del modelo a escala 1:20, así como las variables hidrodinámicas relevantes sobre la vigencia del criterio de similitud según Euler.

CUADRO No. 5.4: Dimensiones geométricas y variables hidrodinámicas del modelo.

DIMENSIÓN		PROTOTIPO	MODELO
CAUDALES MÁXIMOS	Túnel Sarapullo	40.0 m ³ /s	22.4 l/s
	Toma Embalse Toachi	64.1 m ³ /s	36.0 l/s
	Galería de Interconexión	104.1 m ³ /s	58.2 l/s
TÚNEL SARAPULLO	Diámetro	3.80m	0.19m
	Longitud	40.00m	2.00m
TOMA EMBALSE TOACHI	Sección	5.75 x 7.50m	0.29 x 0.38m
GALERÍA DE INTERCONEXIÓN	Sección	3.50 x 5.60m	0.18 x 0.28m
	Longitud	50.00m	2.50m

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

El área total requerida (26 m²) para el estudio experimental es aquel disponible en el área cubierta del Laboratorio del CIERHI, la misma que incluye las dos estructuras de alimentación del túnel de descarga y bocatoma, el área de simulación de la estructura de unión y la estructura de descarga para la consecuente restitución del caudal al sistema de recirculación del laboratorio.

5.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO Y CHEQUEO DE LAS DIMENSIONES DE LAS ESTRUCTURAS, DE LAS INSTALACIONES Y DE LOS EQUIPOS A SER UTILIZADOS.

5.3.1 GENERALIDADES

El modelo hidráulico de la estructura de Unión Sarapullo-Toachi se construyó en el interior del Centro de Investigaciones y Estudios del Recurso Hídrico (CIERHI),

de la Escuela Politécnica Nacional, como se indica en el Plano MH3.PHC-001, adjunto en el Anexo No. 4.

El laboratorio cuenta con un sistema de bombeo con capacidad para 800 l/s, un canal de recirculación de flujo y varias tomas de agua a lo largo del perímetro de la planta del laboratorio. En el modelo se usan dos tomas de agua: (i) para el tanque de entrada al Túnel de Descarga Sarapullo y (ii) para el tanque de entrada a la Bocatoma Toachi.

Cada uno de los vértices y puntos particulares de las estructuras componentes del modelo Estructura de Unión Sarapullo – Toachi, fueron colocados con equipo topográfico: una estación total (LEYCA) y un nivel topográfico (SOKIA). Las coordenadas relativas para la ubicación de dichos puntos se las ubica en base a un levantamiento previo del laboratorio del CIERHI.

FOTOGRAFÍA No. 5.1.- Replanteo Tanque de Descarga.



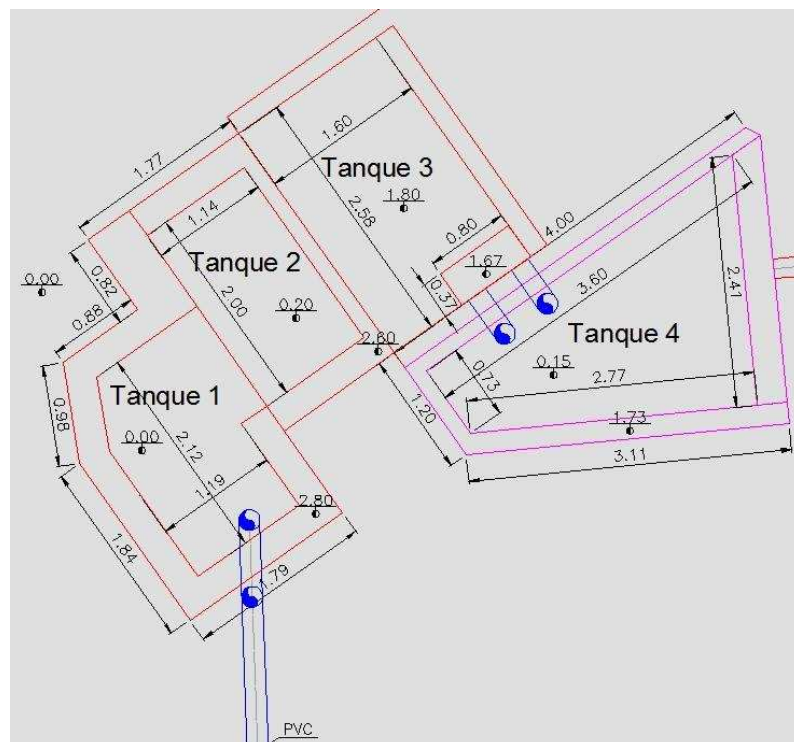
5.3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO

5.3.2.1 Tanques de Abastecimiento

5.3.2.1.1 Tanque de entrada al Túnel de Descarga Sarapullo:

Se utilizan como estructuras de abastecimiento al Túnel de Descarga Sarapullo los tanques existentes en el CIERHI, cuyas dimensiones se indican en la Figura No. 5.1.

FIGURA No. 5.1: Tanques de abastecimiento al Túnel de Descarga Sarapullo.



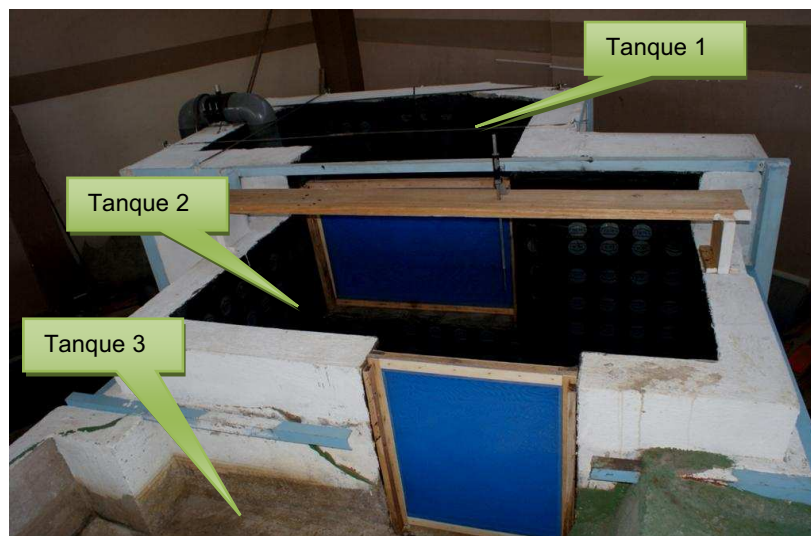
Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Los tanques 1, 2 y 3 están contruidos de hormigón armado, reforzados externamente con perfiles de acero e impermeabilizados en su interior, con láminas de material Super K (tipo Chova).

El tanque 4 está construido en mampostería e igualmente impermeabilizado con láminas Super K (tipo Chova).

En las siguientes fotografías se observan los tanques de abastecimiento del Túnel de Descarga Sarapullo. La adecuación del tanque 4 se muestra en el Anexo No. 2.

FOTOGRAFÍA No. 5.2: Tanques de abastecimiento para el Túnel de Descarga Sarapullo.



FOTOGRAFÍA No. 5.3: Vista lateral de los tanques de entrada al Túnel de Descarga Sarapullo.



FOTOGRAFÍA No. 5.4: Vista superior del tanque 4 de entrada al Túnel de Descarga Sarapullo.



5.3.2.1.2 Tanque de entrada a la Bocatoma de la Presa Toachi:

Este tanque cuyas losas de fondo se encuentran construidas en tres niveles diferentes, los detalles geométricos del tanque se muestran en los Planos MH3.PHC-002 y MH3.PHC-003 del Anexo No. 4.

Está construido con paredes portantes, losa de 15 cm de espesor de hormigón armado y paredes de mampostería de 20 cm de ancho impermeabilizadas en su interior, (ver Anexo No. 1).

El tanque de entrada a la Bocatoma de la Presa Toachi tiene una característica singular en cuanto a su configuración geométrica, ya que posee 3 losas de fondo, construidas en tres niveles diferentes. En general, este tanque está construido con paredes portantes y paredes de mampostería de 20 cm. de ancho, con losas de 15 cm de espesor. Adicionalmente, cuenta con impermeabilización en todas sus paredes y losas.

FOTOGRAFÍA No. 5.5: Construcción tanque de abastecimiento Presa Toachi.



FOTOGRAFÍA No. 5.6: Vista frontal del tanque de abastecimiento Presa Toachi.



FOTOGRAFÍA No. 5.7: Vista lateral del tanque de abastecimiento Presa Toachi.



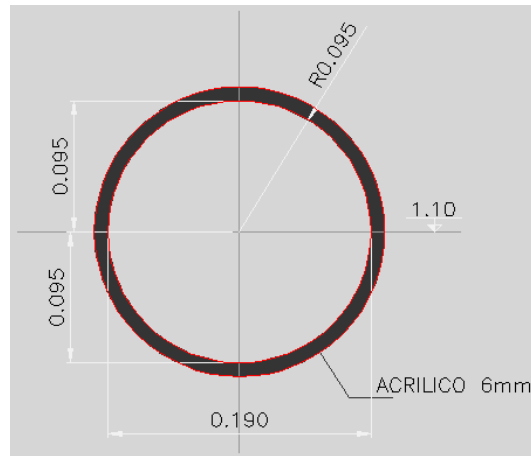
5.3.3 MODELO DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO – TOACHI

La Estructura de Unión Sarapullo – Toachi se compone de tres elementos principales: el Túnel de Descarga Sarapullo, la Estructura de Unión y la Galería de Interconexión. Se han representado 44 m del túnel de descarga Sarapullo a la zona de aproximación a la estructura de unión y 60 m de la galería de interconexión.

5.3.3.1 Túnel de Descarga Sarapullo

Tubo circular moldeado en acrílico, de 6mm de espesor con un diámetro interno de 0.19 m y con una longitud de 2.1 m. Aguas abajo de éste se dispone de una estructura de transición que cumple la función de empatar el tubo circular con la sección de la estructura de unión. En la parte superior de esta pieza se inicia el pozo de descarga, que funciona cuando la Central Alluriquín este fuera de actividad.

FIGURA No. 5.2: Sección transversal del Túnel de Descarga Sarapullo.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

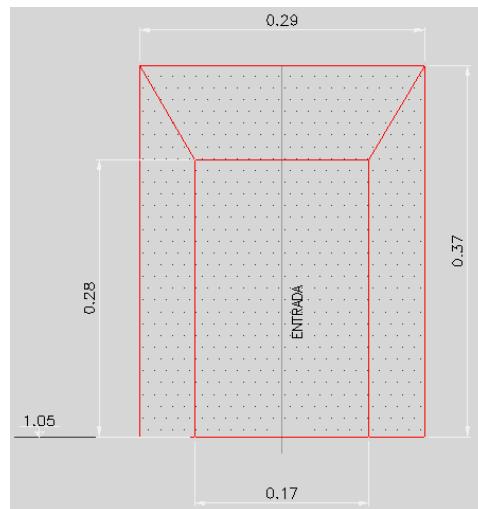
FOTOGRAFÍA No. 5.8: Estructura de Transición Túnel de Descarga Sarapullo – Estructura de Unión.



5.3.3.2 Bocatoma de la presa Toachi

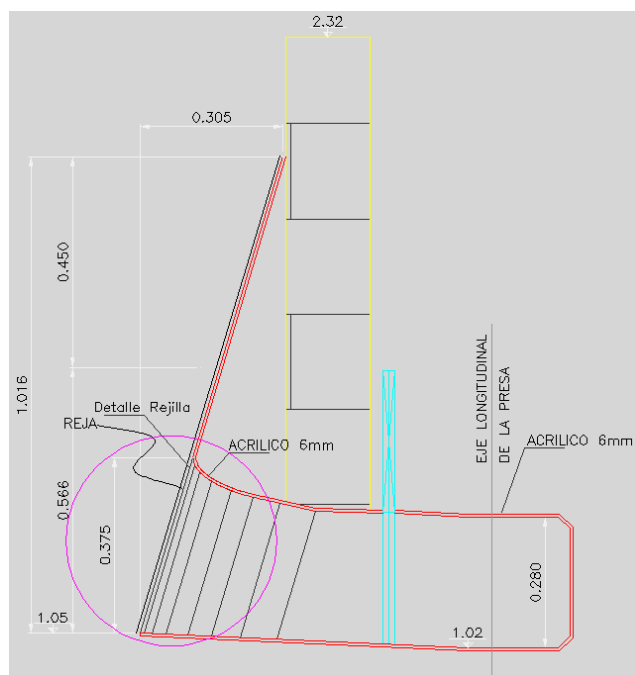
La estructura de toma está moldeada en acrílico de 4mm de espesor. La bocatoma tiene una variación de sección tanto en planta como en corte, teniendo como sección inicial $29 \times 37\text{cm}$ y como sección final $17 \times 28\text{cm}$, esta última coincide con la sección de la galería de interconexión.

FIGURA No. 5.3: Sección transversal de la Bocatoma del Embalse Toachi.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 5.4: Corte longitudinal de la Bocatoma del Embalse Toachi.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FOTOGRAFÍA No. 5.9: Moldeado Bocatoma de la Presa Toachi.



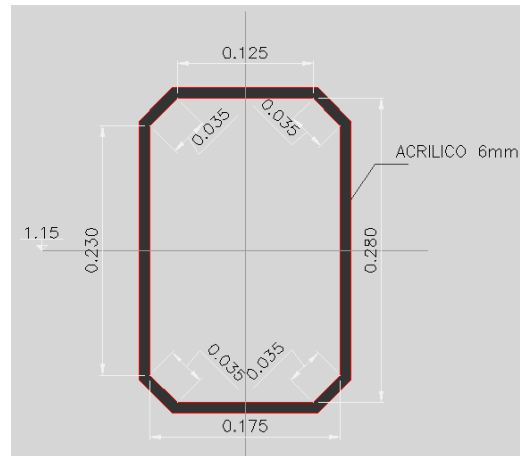
FOTOGRAFÍA No. 5.10: Pieza en acrílico de la Bocatoma de la Presa Toachi.



5.3.3.3 Galería de Interconexión

Estructura rectangular con una sección de 0.29 x 0.39 m con chaflanes en sus esquinas a 45° de 0.04 m de largo, con una longitud aproximada de 2.5 m. Al final de ésta estructura se tiene una transición no excéntrica, de 0.60 m de longitud, que conecta la sección rectangular de la galería con una sección circular de 0.20 m.

FIGURA No. 5.5: Sección transversal de la Galería de Interconexión.



FOTOGRAFÍA No. 5.11: Armado de la Galería de Interconexión.



FOTOGRAFÍA No. 5.12: Moldeado en acrílico de la transición.

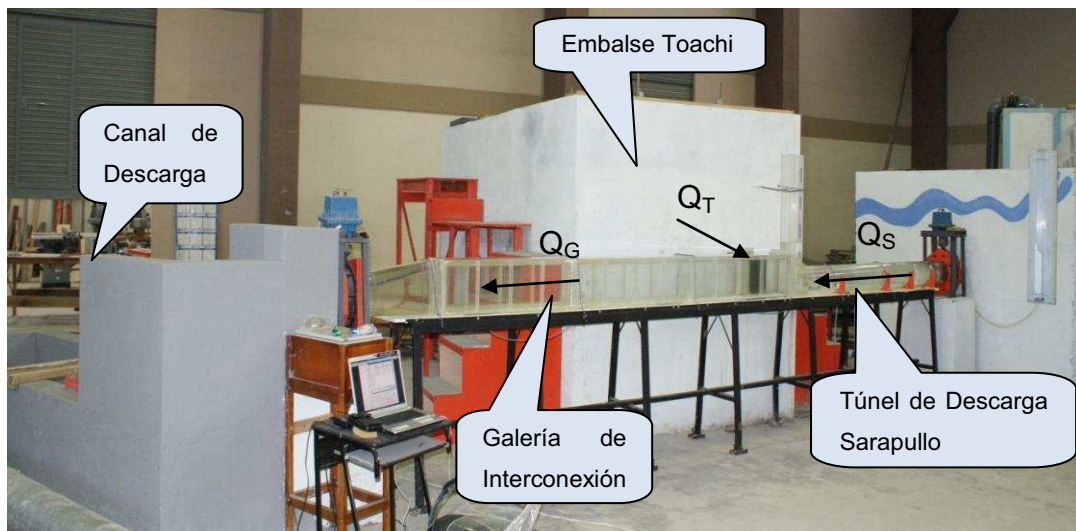


Al terminar la construcción de las piezas de los elementos que conforman el modelo, se procedió a instalarlos en el laboratorio del CIERHI. El montaje de las piezas se lo realizó sobre una mesa completamente nivelada (+1.016 m).

FOTOGRAFÍA No. 5.13: Montaje de piezas en acrílico del modelo.



FOTOGRAFÍA No. 5.14: Modelo de Estructura de Unión Sarapullo-Toachi.



Los detalles se encuentran en el plano MH3.PHC-004 localizado en el Anexo No. 4.

5.3.4 INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPAMIENTO

5.3.4.1 Elementos de derivación del agua hacia los tanques de abastecimiento.

Se dispone de dos tomas independientes hacia los tanques de abastecimiento del modelo, cada uno de las cuales se inicia con un codo de 90°, seguido de una válvula de compuerta conectada a la tubería de admisión, de diámetro 200 mm.

La tubería correspondiente al tanque que abastece al túnel de descarga Sarapullo, tiene las siguientes características: longitud de la tubería, 9.27 m, sujeta mediante abrazaderas y pernos sobre los apoyos de hormigón. Adicionalmente, se tienen tres codos de 90° y en la parte superior se encuentra instalada una válvula de aire.

FOTOGRAFÍA No. 5.15: Tubería y accesorios correspondientes al tanque de abastecimiento del túnel de descarga Sarapullo.



FOTOGRAFÍA No. 5.16: Válvula de aire colocada en la parte superior de la tubería.



Para el tanque de abastecimiento correspondiente al embalse Toachi es necesario una tubería de 2.5 metros de longitud, sujeta mediante abrazaderas y pernos al tanque de hormigón; se dispone de 3 codos adicionales y una válvula de aire en la parte superior.

FOTOGRAFÍA No. 5.17: Tubería y accesorios correspondientes al tanque de abastecimiento del Embalse Toachi.

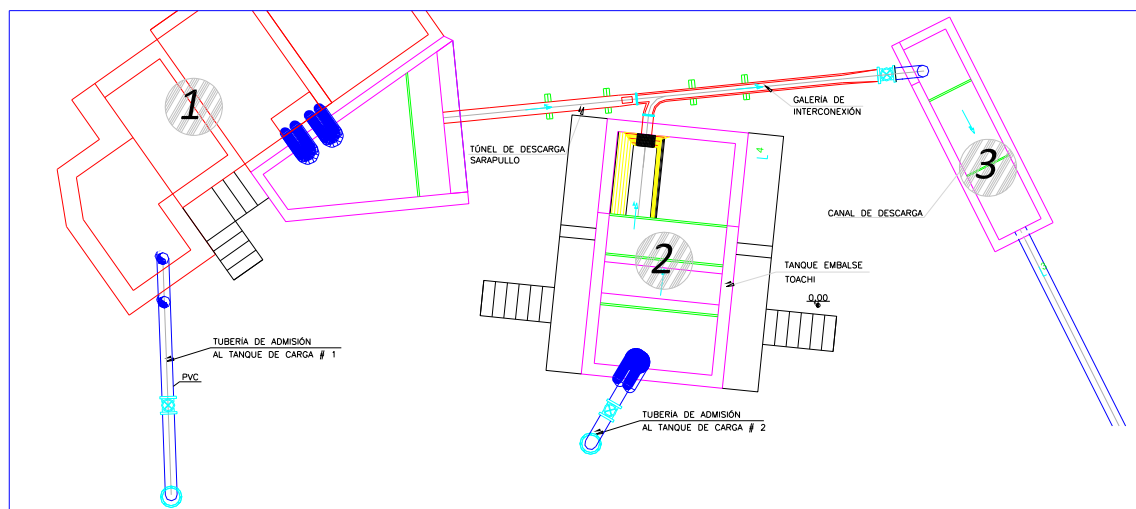


Para lograr una mejor disipación de energía del chorro de salida de cada una de las tuberías de abastecimiento a los respectivos tanques, la tubería se encuentra perforada después de la válvula de aire.

5.3.4.2 Vertederos de Medida

Para la medición de caudales de entrada y salida del modelo, se colocaron tres vertederos: dos vertederos de pared delgada y un vertedero triangular con un ángulo de 70° . Los vertederos rectangulares están localizados en los tanques de abastecimiento del túnel de descarga Sarapullo (1) y del embalse Toachi (2), mientras que el triangular se ubica en el canal de descarga del modelo (3). Todos los vertederos son de madera pintada y lacada para protegerlos del agua.

FIGURA No. 5.6: Ubicación de vertederos de medida.

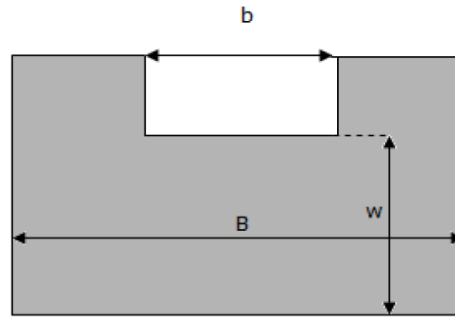


Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

5.3.4.2.1 Vertedero correspondiente al tanque de abastecimiento del túnel de descarga Sarapullo.

Vertedero rectangular construido en madera, sujeto con pernos a las paredes y pintado con esmalte. Las dimensiones del mismo son: $w = 2.35$ m, $b = 0.67$ m, $B = 2.00$ m.

FIGURA No. 5.7: Esquema de dimensiones del vertedero de medida.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

El coeficiente de descarga μ se calcula mediante la fórmula propuesta por Hegly para vertederos rectangulares con contracciones laterales²³:

$$\mu = \left[0.6075 - 0.045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0.0041}{h} \right] \left[1 + 0.55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$$

Rangos de validez de la ecuación:

$$0.01\text{m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}; b \geq 0.30 \text{ m}; w \geq 0.06\text{m}; h/w \leq 1$$

Condiciones que se cumplen satisfactoriamente para el vertedero rectangular de medida en el tanque de entrada al Túnel de Descarga Sarapullo.

FOTOGRAFÍA No. 5.18: Vertedero rectangular 1, en operación.

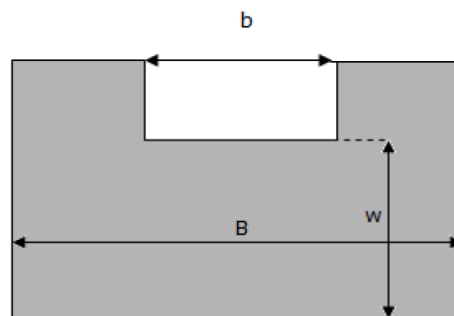


²³ "Hidráulica General", Sotelo G., Limusa, Décima Octava Edición, 1997.

5.3.4.2.2 *Vertedero correspondiente al tanque de abastecimiento del Embalse Toachi.*

Vertedero rectangular construido en madera debidamente sellada pintada y lacada, sujeto a las paredes con pernos, pintado con esmalte y con las siguientes dimensiones: $w = 0.93$ m, $b = 1.00$ m, $B = 2.09$ m.

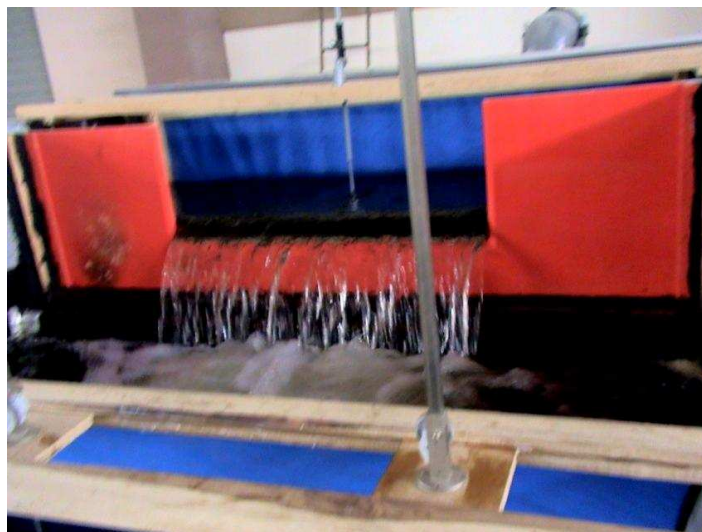
FIGURA No. 5.8: Esquema de dimensiones del vertedero de medida.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Al igual que para el primer vertedero, se utiliza la fórmula de Hégly para obtener el coeficiente de descarga μ .

FOTOGRAFÍA No. 5.19: Vertedero rectangular 2, en operación.



5.3.4.2.3 *Vertedero correspondiente al canal de descarga del modelo.*

Vertedero triangular construido de madera, pintada con esmalte y sujetado mediante pernos, con las siguientes dimensiones: $w= 0.15$ m, $b= 0.70$ m, $B= 0.80$ m y $\theta = 70^\circ$.

FOTOGRAFÍA No. 5.20: Vertedero triangular 3, en operación.



5.3.4.2.4 *Limnímetros*

Se utilizan limnímetros para medir la carga de agua sobre cada uno de los vertederos de medida en cada tanque de abastecimiento y de igual forma en el canal de descarga. De acuerdo con la curva de descarga correspondiente a cada vertedero y con el valor de la carga medida con el limnímetro se puede calcular el caudal de circulación en cada tramo del modelo. La apreciación de los limnímetros es de 0.1 cm.

Los limnímetros están ubicados aguas arriba de cada vertedero y están colocados sobre soportes de madera, los mismos que son desplazables y pueden ser trasladados sobre las diferentes secciones determinadas para cada medición en cada prueba. Se utilizan limnímetros de 40 cm y 60 cm, en función del rango requerido para la correcta medición de la profundidad de agua.

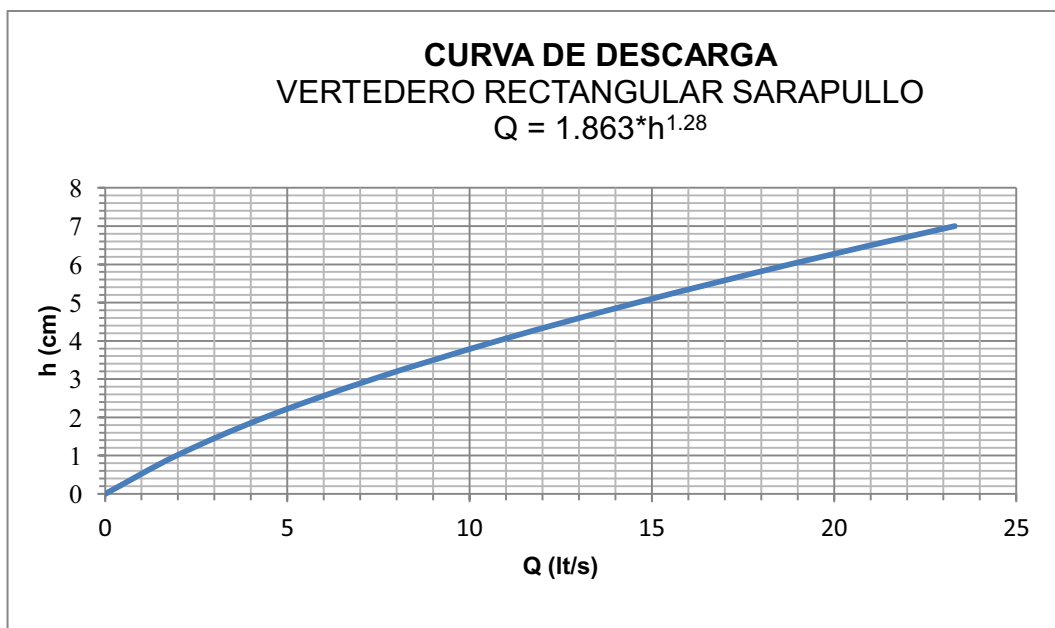
FOTOGRAFÍA No. 5.21: Limnímetro.



5.3.4.3 Curvas de descarga para los vertederos de medida

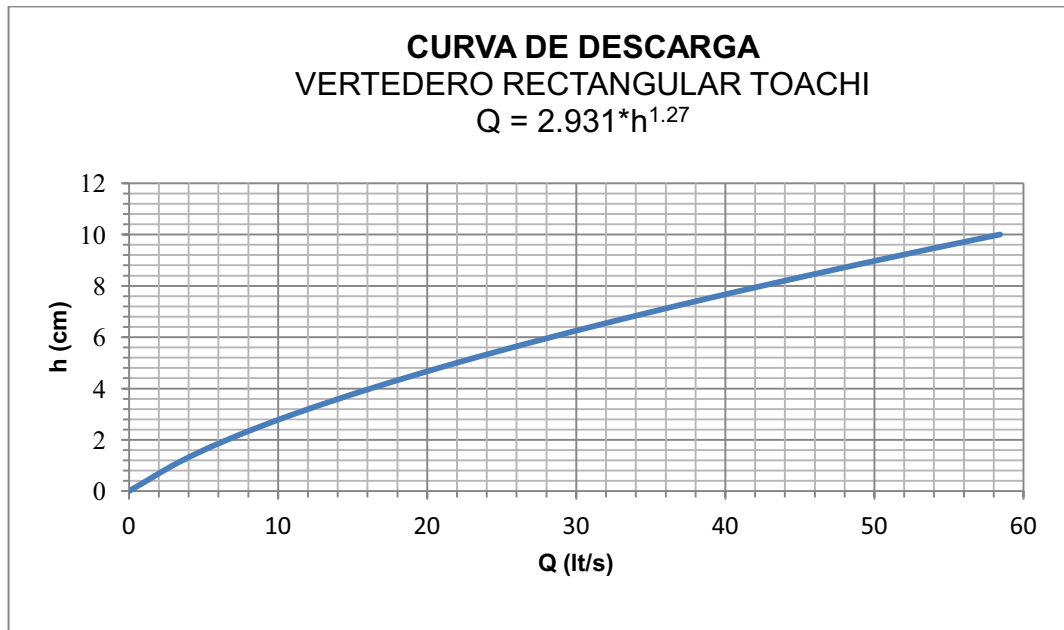
A continuación se presentan las curvas de descarga obtenidas en base a la literatura técnica. Los coeficientes de las ecuaciones de descarga varían de acuerdo a las características geométricas particulares de cada vertedero.

FIGURA No. 5.9: Curva de descarga del vertedero rectangular – Túnel de Descarga Sarapullo.



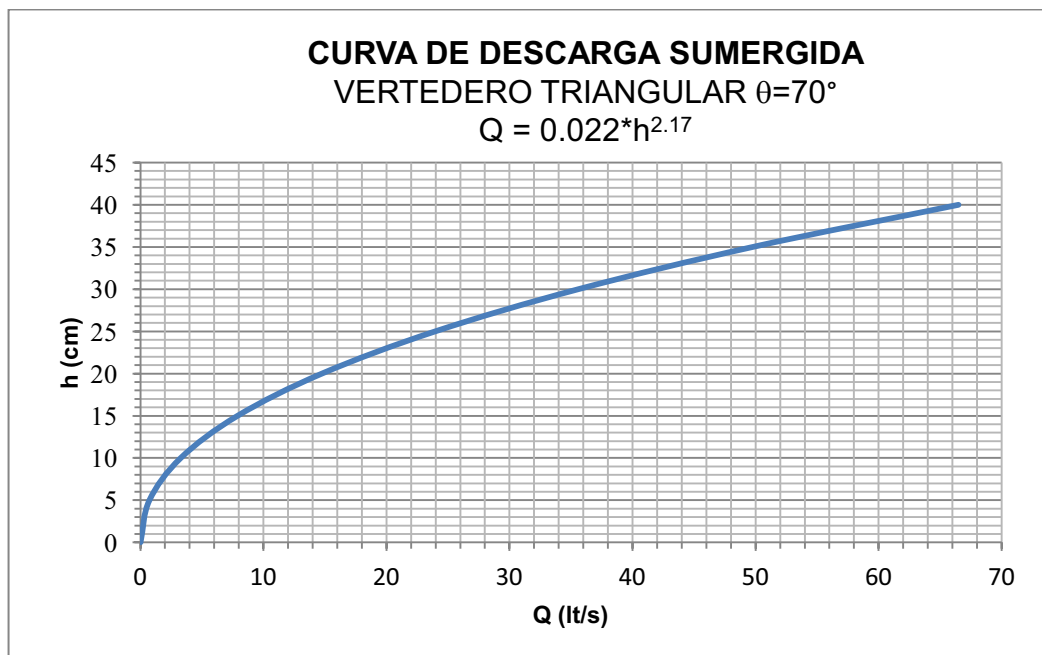
Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 5.10: Curva de descarga del vertedero rectangular – Embalse Toachi).



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 5.11: Curva de descarga del vertedero triangular – Canal de Descarga del modelo.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

5.4 OBJETIVOS, ALCANCE Y PLAN DE PRUEBAS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO.

5.4.1 OBJETIVOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para garantizar la similitud dinámica según el criterio de Euler es necesario verificar la similitud geométrica entre modelo y prototipo; y, en los modelos de este tipo, los denominados “*efectos de escala*” están relacionados con las posibles variaciones de esta similitud geométrica.

Las pruebas de la fase de calibración sirven principalmente para demostrar la garantía y la validez de la similitud planteada, inicialmente expuesta previa la realización del modelo hidráulico.

De igual manera, se debe demostrar con estas pruebas, que las hipótesis y bases teóricas de la similitud de Euler, se mantienen satisfactoriamente y en forma apropiadamente aproximada.

5.4.2 ALCANCE DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO

En el Cuadro No. 5.5 se muestra la comparación entre las medidas de modelo planteadas y construidas, como también el porcentaje de diferencia que existe entre los valores.

CUADRO No. 5.5: Comparación de medidas de modelo Planteadas – Construidas.

<u>Túnel de descarga Sarapullo</u>			
Dimensión	Medidas Planteadas	Medidas Construidas	% de Diferencia
φ (m) =	0.190	0.191	0.5

CUADRO No. 5.5: Continuación.**Pozo**

Dimensión	Medidas Planteadas	Medidas Construidas	% de Diferencia
b (m) =	0.175	0.174	0.6
h (m) =	0.100	0.103	3.0

Ancho canal de aproximación a la Bocatoma

SECCIÓN	Medidas Planteadas	Medidas Construidas	% de Diferencia
b (m) =	0.400	0.396	1.0

Bocatoma

Dimensión	Medidas Planteadas	Medidas Construidas	% de Diferencia
b inicial (m) =	0.287	0.280	2.4
h inicial (m) =	0.375	0.387	3.2
b final (m) =	0.175	0.172	1.7
h final (m) =	0.280	0.278	0.7

Galería de Interconexión

Dimensión	Medidas Planteadas	Medidas Construidas	% de Diferencia
b (m) =	0.125	0.125	0.0
h (m) =	0.280	0.279	0.4

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

La desviación máxima, en las secciones transversales, en la alineación del modelo en acrílico se presenta en la bocatoma del Embalse Toachi, con una variación del 3.2%. Las variaciones señaladas en el cuadro anterior se encuentran dentro de los límites admisibles, por lo que se puede concluir que el modelo es geoméricamente similar dando lugar a que la similitud adoptada, se cumple apropiadamente.

5.4.3 PLAN DE PRUEBAS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO

5.4.3.1 Calibración de los vertederos de medida

La calibración de los vertederos de medida se realiza efectuando mediciones de caudales dentro del rango de valores a utilizarse en la investigación: 19.14 m³/s – 104.14 m³/s. Se utiliza un aforo volumétrico para obtener el caudal que circula en

el modelo para cada una de las pruebas, es decir, con un recipiente de plástico de volumen conocido se recolecta el flujo en la descarga del vertedero y mediante un cronómetro se registra el tiempo de llenado (Fotografía No. 5.22).

Cada caudal medido a través del método volumétrico, se lo asocia con una carga sobre el vertedero a calibrarse, así, dentro del presente modelo se tomaron mediciones de la carga sobre los vertederos del tanque – Túnel de Descarga Sarapullo, del tanque – Embalse Toachi y del canal de descarga del modelo. (Ver Anexo No. 1).

FOTOGRAFÍA No. 5.22: Calibración volumétrica de los vertederos de medida.



En los cuadros siguientes se presentan los resultados de la calibración de los vertederos de medida.

CUADRO No. 5.6: Pruebas de calibración del vertedero rectangular – Túnel de Descarga Sarapullo.

PRUEBA Nº	MEDICIÓN VOLUMÉTRICA			VALOR TEÓRICO		DIFERENCIA (%)
	TIEMPO PROM. (s)	VOLUMEN (lt)	CAUDAL (lt/s)	CARGA (cm)	CAUDAL CALC. (lt/s)	
1	56.44	38	0.67	0.55	0.71	4.8
2	9.13	38	4.16	1.79	3.86	7.2
3	5.44	38	6.99	2.57	6.50	6.9
4	3.10	38	12.26	4.27	13.50	9.2

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

CUADRO No. 5.7: Pruebas de calibración del vertedero rectangular – Embalse Toachi.

PRUEBA Nº	MEDICIÓN VOLUMÉTRICA			VALOR TEÓRICO		DIFERENCIA (%)
	TIEMPO PROM. (s)	VOLUMEN (lt)	CAUDAL (lt/s)	CARGA (cm)	CAUDAL CALC. (lt/s)	
1	226.64	38	0.17	0.21	0.17	3.9
2	26.14	38	1.45	0.76	1.36	6.2
3	12.38	38	3.07	1.27	3.10	0.9
4	6.45	38	5.89	1.80	5.41	8.2
5	4.69	38	8.11	2.47	8.97	9.7

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

CUADRO No. 5.8: Pruebas de calibración del vertedero triangular – Canal de Descarga del modelo.

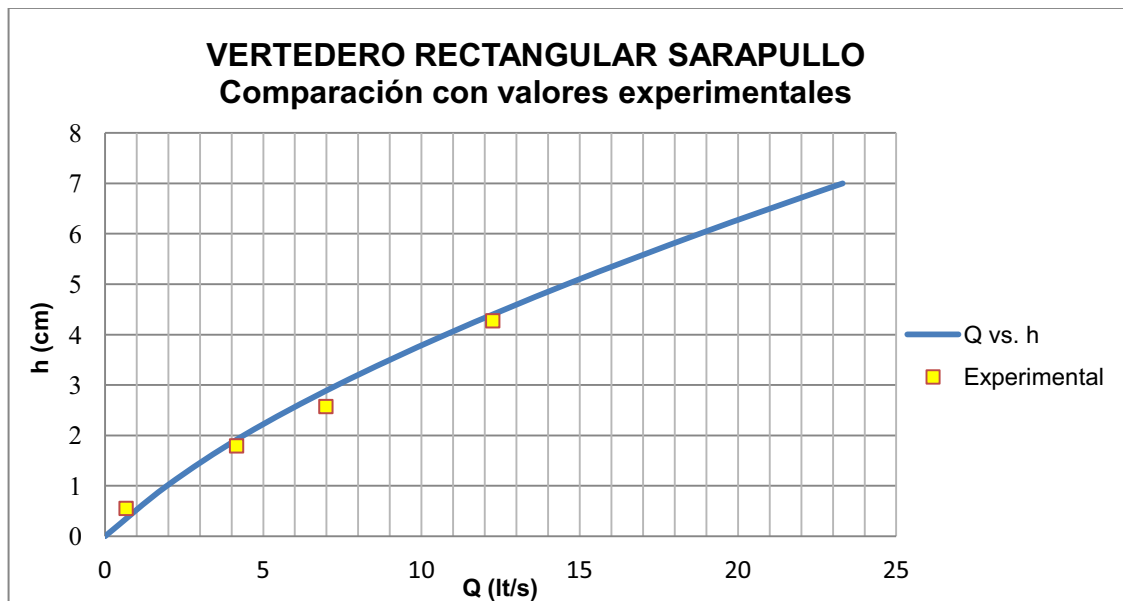
PRUEBA Nº	MEDICIÓN VOLUMÉTRICA			VALOR TEÓRICO		DIFERENCIA (%)
	TIEMPO PROM. (s)	VOLUMEN (lt)	CAUDAL (lt/s)	CARGA (cm)	CAUDAL CALC. (lt/s)	
1	226.64	38	0.17	2.49	0.16	6.5
2	26.14	38	1.45	7.23	1.61	9.9
3	12.38	38	3.07	9.87	3.19	3.7
4	9.13	38	4.16	11.04	4.07	2.2
5	6.45	38	5.89	12.85	5.68	3.7
6	5.44	38	6.99	14.30	7.17	2.6
7	4.69	38	8.11	14.88	7.82	3.5
8	3.10	38	12.26	18.24	12.21	0.4

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Los valores de la medición volumétrica de caudal se diferencian en un máximo del 9.9% en comparación con los valores de caudal obtenidos teóricamente. Esta variación se debe a que los tiempos de llenado del recipiente plástico, para caudales grandes, son muy cortos, por lo que la curva de descarga teórica de los vertederos de medida es tomada como válida para la medición de caudales para la presente investigación. Las Figuras No. 5.12, 5.13 y 5.14, muestran las curvas de descargas utilizadas medición de caudales de ingreso para las pruebas de

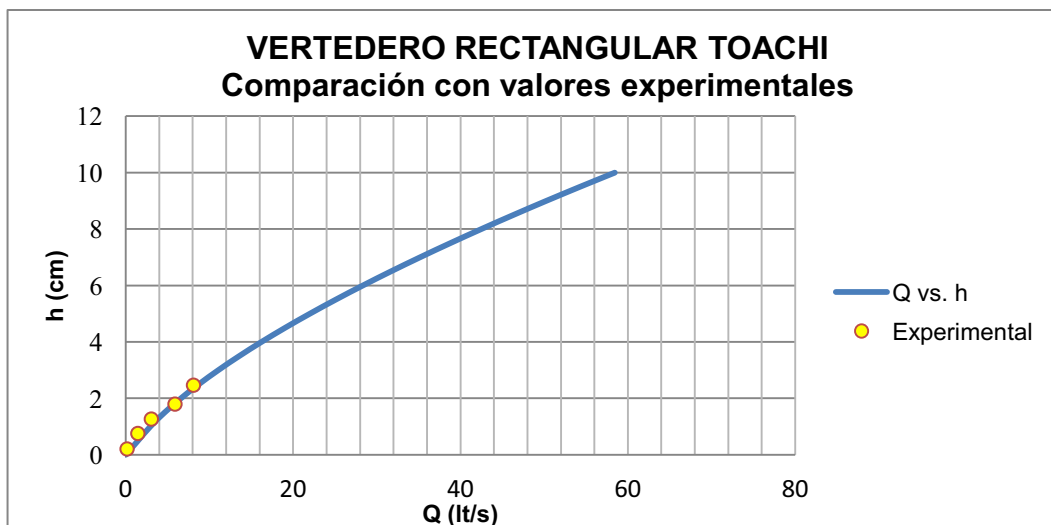
calibración del modelo y las pruebas con diseño original en cada uno de los vertederos descritos anteriormente.

FIGURA No. 5.12: Curva de descarga del vertedero rectangular – Túnel de Descarga Sarapullo (curva teórica y puntos experimentales).



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 5.13: Curva de descarga del vertedero rectangular – Embalse Toachi (curva teórica y puntos experimentales).



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

5.4.3.2 Calibración de Modelo

Para la fase de calibración se ensayaron cuatro escenarios para evaluar el funcionamiento de la unión de los flujos. En el Cuadro No. 5.8 se muestran los valores de los caudales de ingreso tanto del túnel de descarga Sarapullo como los provenientes del Embalse Toachi.

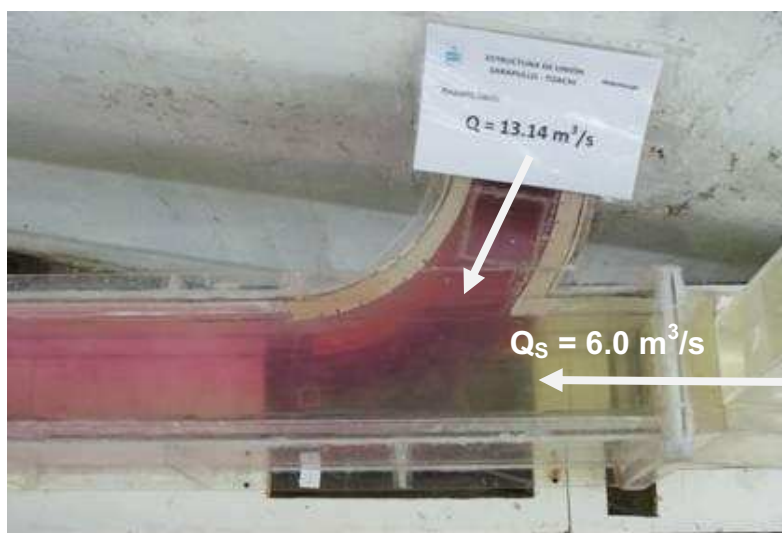
CUADRO No. 5.9: Pruebas de calibración de modelo.

Prueba N°	TÚNEL DE DESCARGA SARAPULLO		BOCATOMA EMBALSE TOACHI		GALERÍA DE INTERCONEXIÓN	
	Caudal Prototipo (m ³ /s)	Caudal Modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m ³ /s)	Caudal Modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m ³ /s)	Caudal Modelo (l/s)
1	6.0	3.4	13.1	7.4	19.1	10.8
2	40.0	22.4	64.1	35.9	104.1	58.3
3	6.0	3.4	31.5	17.6	37.5	21.0
4	13.3	7.5	57.5	32.1	70.8	39.6

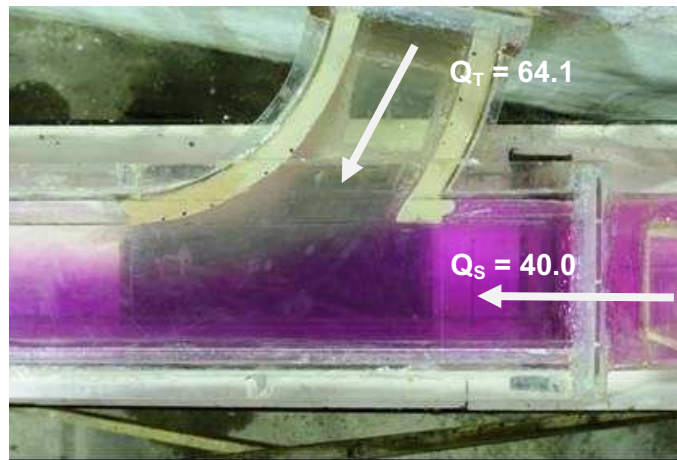
Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Las siguientes fotografías muestran el funcionamiento de la unión, con cada una de las pruebas ensayadas en esta fase. (Ver Anexo No. 1)

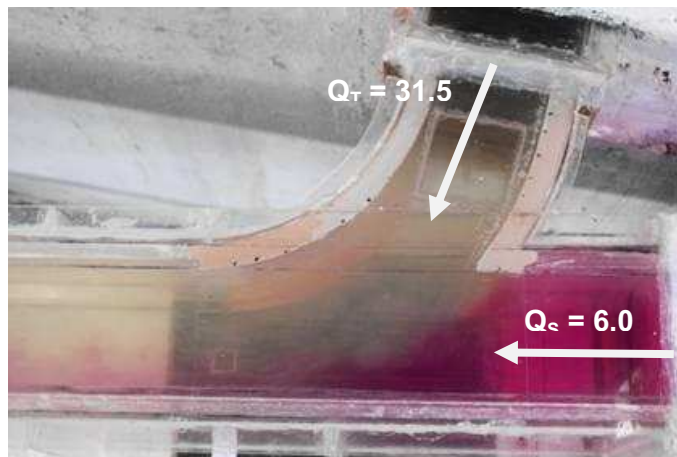
FOTOGRAFÍA No. 5.23: Prueba No 1, Escenario No. 2, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.31$; $Q_T/Q_G = 0.69$.



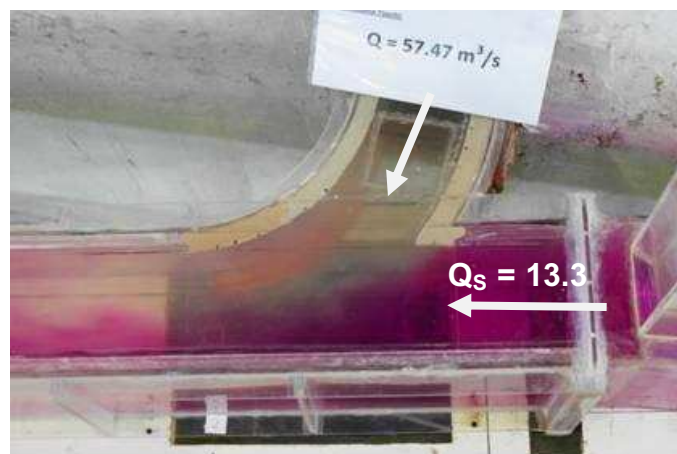
FOTOGRAFÍA No. 5.24: Prueba No 2, Escenario No. 1, relación de caudales
 $Q_S/Q_G = 0.38$, $Q_T/Q_G = 0.62$.



FOTOGRAFÍA No. 5.25: Prueba No 3, Escenario No. 5, relación de caudales
 $Q_S/Q_G = 0.16$; $Q_T/Q_G = 0.84$.



FOTOGRAFÍA No. 5.26: Prueba No 4, Escenario No.6, relación de caudales
 $Q_S/Q_G = 0.19$; $Q_T/Q_G = 0.81$.



5.4.3.3 Análisis de los resultados de las pruebas de calibración.

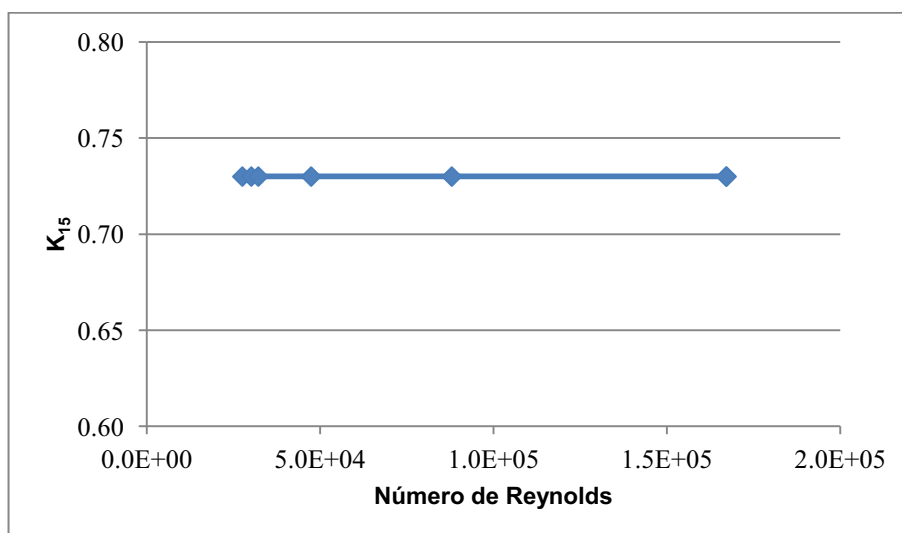
Se realizó la evaluación del coeficiente de pérdida localizada de la estructura de unión versus el valor del número de Reynolds para cada una de las pruebas ejecutadas. Los resultados se muestran en los cuadros presentados a continuación.

CUADRO No. 5.10: Variación del coeficiente “k” entre Túnel Sarapullo (piezómetro 1) y la salida de la Estructura de Unión (piezómetro 5) con respecto al número de Reynolds.

Prueba	Re_m	k_{1-5}
1	2.80E+04	0.073
	3.00E+04	0.073
	3.20E+04	0.072
2	4.70E+04	0.073
3	8.80E+04	0.072
4	1.70E+05	0.073
	1.70E+05	0.073

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares.

FIGURA No. 5.14: Coeficiente de pérdida de energía local en el tramo 1 – 5 versus número de Reynolds.



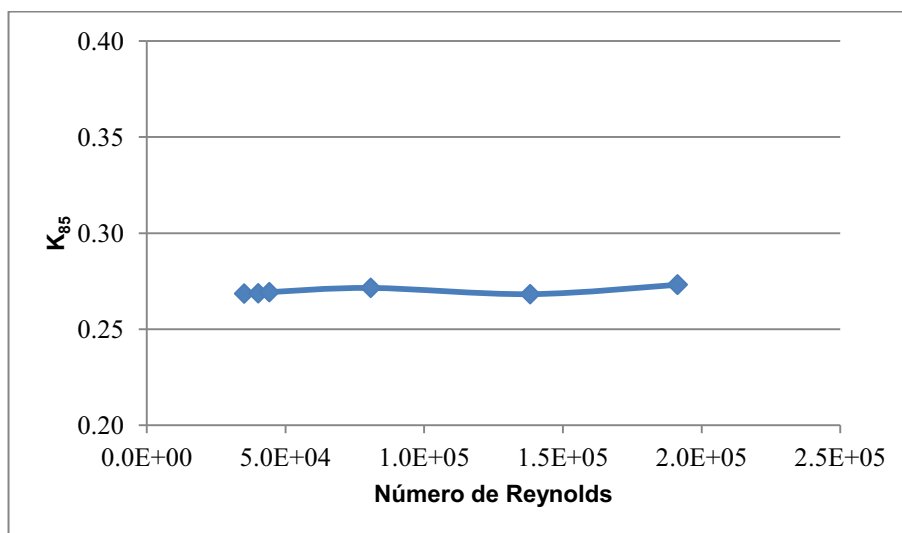
Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

CUADRO No. 5.11: Variación del coeficiente “k” entre Embalse Presa Toachi (punto de medida 8) y la salida de la Estructura de Unión (piezómetro 5) en función del número de Reynolds.

Prueba	Re_m	K_{8-5}
1	3.50E+04	0.269
	4.00E+04	0.269
	4.40E+04	0.269
2	8.10E+04	0.272
3	1.40E+05	0.268
4	1.90E+05	0.273
	1.90E+05	0.273

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 5.15: Coeficiente de pérdida de energía local en el tramo 8 – 5 versus número de Reynolds.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Se observa que el valor de “k” se mantiene relativamente constante a medida que varía el número de Reynolds en los dos tramos de la unión por lo que se concluye que el flujo se mantiene turbulento totalmente desarrollado y el valor de “k” no depende del efecto viscoso de resistencia al movimiento (fricción).

De igual manera, es necesario realizar una comparación entre los valores del coeficiente de fricción “ λ ” de prototipo y de modelo, del tramo correspondiente a la galería de interconexión, bajo las diferentes pruebas ejecutadas.

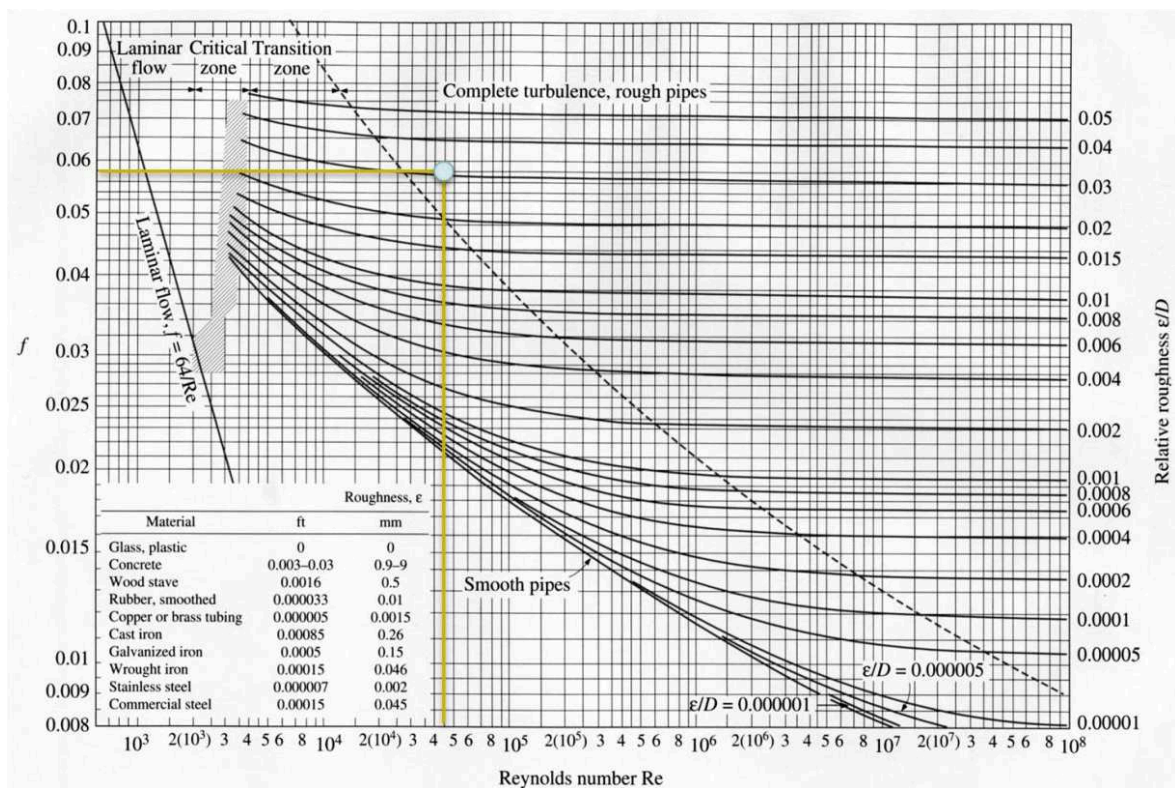
CUADRO No. 5.12: Comparación entre los valores de λ_p y λ_m .

Tramo	Prueba	Re_p	Re_m	λ_p	λ_m	Diferencia λ	% Diferencia λ
Galería de Interconexión	1	3.7E+06	4.4E+04	0.0166	0.0570	0.0405	71.0
	2	2.0E+07	1.9E+05	0.0164	0.0374	0.0210	56.1
	3	7.2E+06	8.1E+04	0.0165	0.0195	0.0030	15.5
	4	1.4E+07	1.4E+05	0.0165	0.0190	0.0026	13.6

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

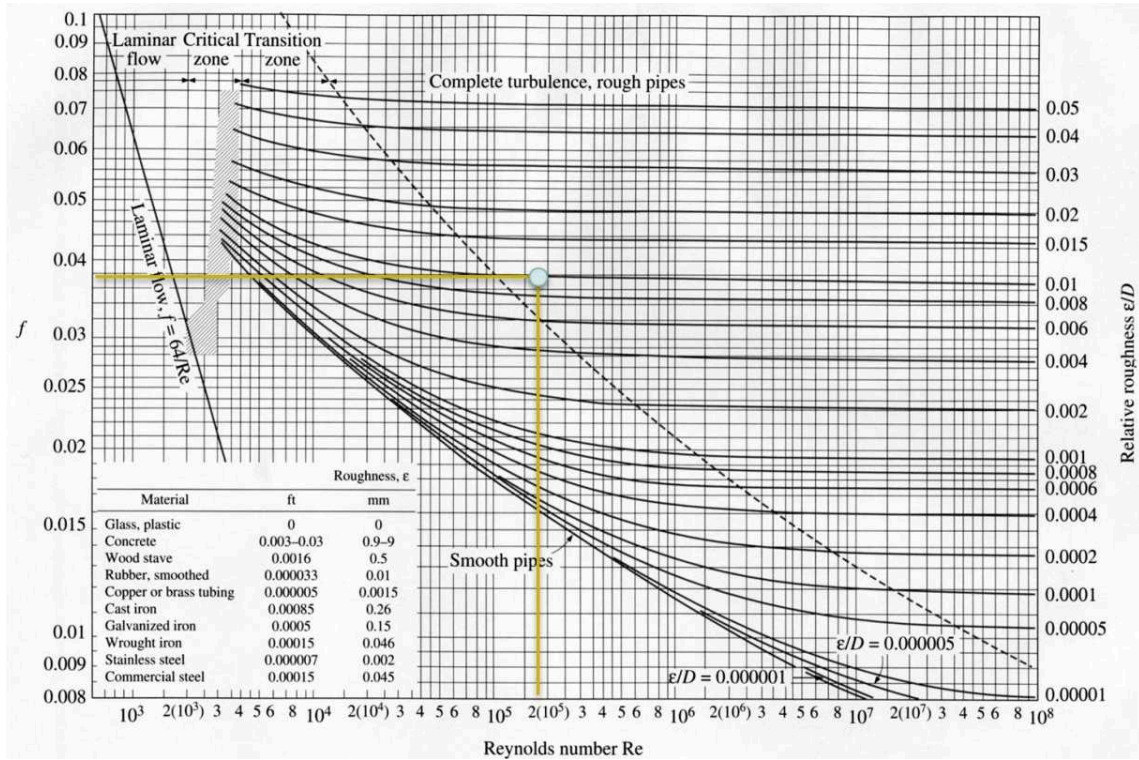
En las figuras siguientes se presenta los resultados obtenidos del coeficiente de fricción (λ_m) en cada una de las pruebas, dentro del Diagrama de Moody, correspondiente al tramo de la galería de interconexión.

FIGURA No. 5.16: Diagrama de Moody, Prueba No. 1.



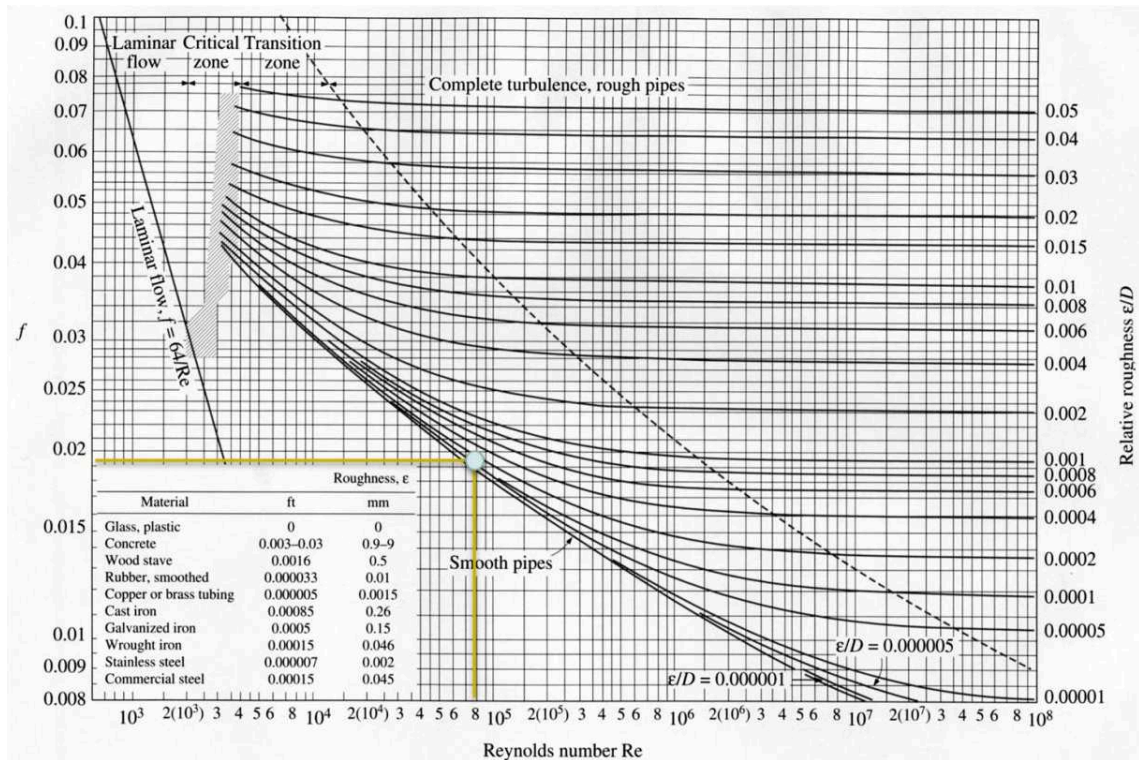
Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 5.17: Diagrama de Moody, Prueba No. 2.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 5.18: Diagrama de Moody, Prueba No. 3.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 5.19: Diagrama de Moody, Prueba No. 4.

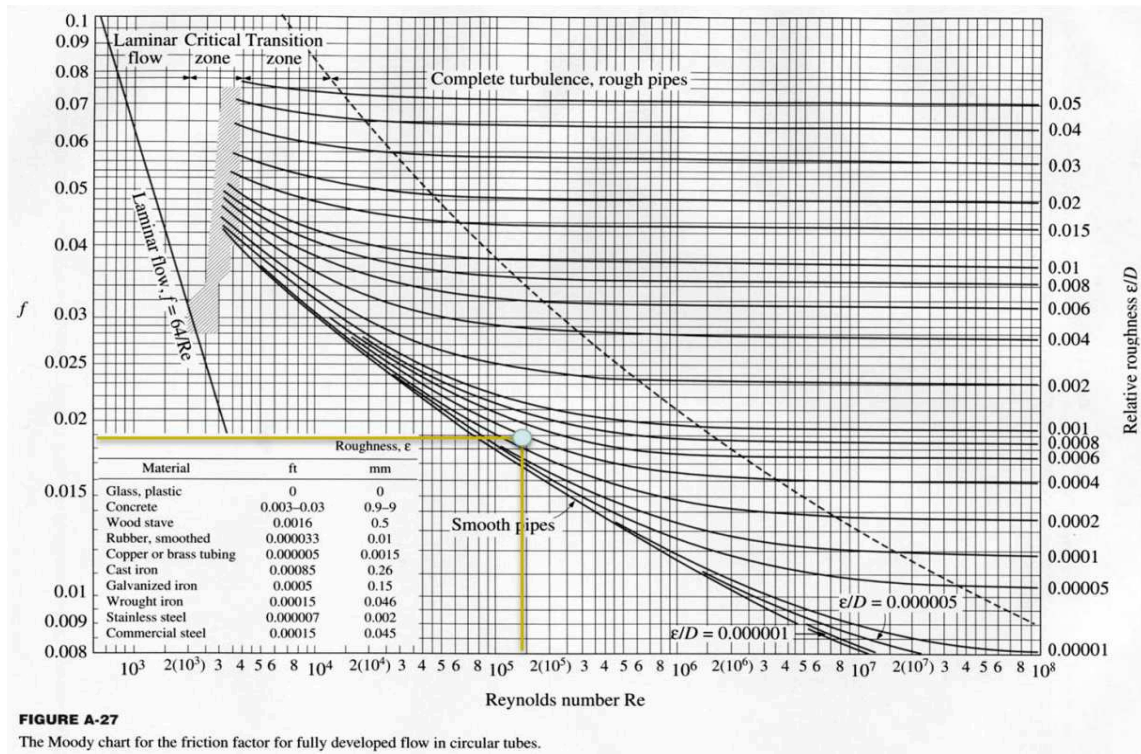


FIGURE A-27

The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Los valores de rugosidad relativa no presentan una limitación sobre las bases y teoría de similitud de Euler bajo la cual se ha obtenido el modelo de estructura de Unión, además que los números de Reynolds en modelo cumplen con la condición de ser mayores a 2×10^4 .

5.5 CONCLUSIONES.

La construcción del modelo fue realizada de manera tal que representó las alineaciones y elevaciones de la estructura unión y de sus estructuras perfectamente, con lo cual se consigue evitar variaciones en la obtención del coeficiente de pérdida local.

El porcentaje de variación máximo entre las medidas de las secciones internas del modelo de la Estructura de Unión, construidas y planteadas, es igual a 3.2%. Este valor se encuentra dentro del rango de variación admisible, cumpliendo satisfactoriamente con la geometría del diseño original, condición por la cual el modelo cumple con las hipótesis y teoría de similitud de Euler.

En el proceso de calibración del modelo se pudo observar que la geometría de las estructuras, tanto del Túnel Sarapullo y de la Galería de Interconexión, son eficientes para los caudales de diseño (máximos), es decir, $104.14 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los resultados del coeficiente de pérdida local de la estructura de unión, obtenidos de las pruebas de calibración, muestran que no hay variación con respecto al número de Reynolds, dando un valor promedio en el tramo túnel de descarga Sarapullo – Galería de Interconexión igual a la 0.073 y en el tramo embalse Toachi – Galería de Interconexión un valor de 0.271.

Para los caudales mínimos o bajos, el número de Reynolds disminuye, obteniéndose valores del coeficiente de fricción altos, esto se debe a que dicho coeficiente es inversamente proporcional a la carga de velocidad.

CAPÍTULO 6

PLAN DE PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS CON EL DISEÑO ORIGINAL

6.1 PLAN DE PRUEBAS POR OBRAS O COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN.

6.1.1 OBJETIVOS DE LA FASE DE PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL

En la fase de pruebas con el diseño original se procura conocer el comportamiento hidráulico de la estructura de unión durante la mezcla de los flujos provenientes del túnel de descarga Sarapullo y la bocatoma de la presa Toachi.

La serie de pruebas programadas para el modelo ayudará a definir la eficiencia del diseño geométrico propuesto, en relación con los patrones de flujo en la zona de aproximación de la unión, ya que con la modelación física se estudia el flujo en forma tridimensional, a diferencia de la mayoría de las fórmulas empleadas en la hidráulica convencional, en las que analiza el flujo de manera bidimensional.

El plan de pruebas propuesto a continuación se basa principalmente en el funcionamiento en conjunto de las dos centrales involucradas en el sistema hidráulico²⁴ y los escenarios más críticos desde el punto de vista de la empresa contratante.

El proceso a seguir durante cada una de las pruebas en esta fase es tomar mediciones de los niveles piezométricos, tanto en la entrada del túnel de descarga

²⁴AH-RP-20 Funcionamiento hidráulico chimenea inferior Sarapullo-embalse Toachi, HIDROTOAPI E.P., Agosto 2010.

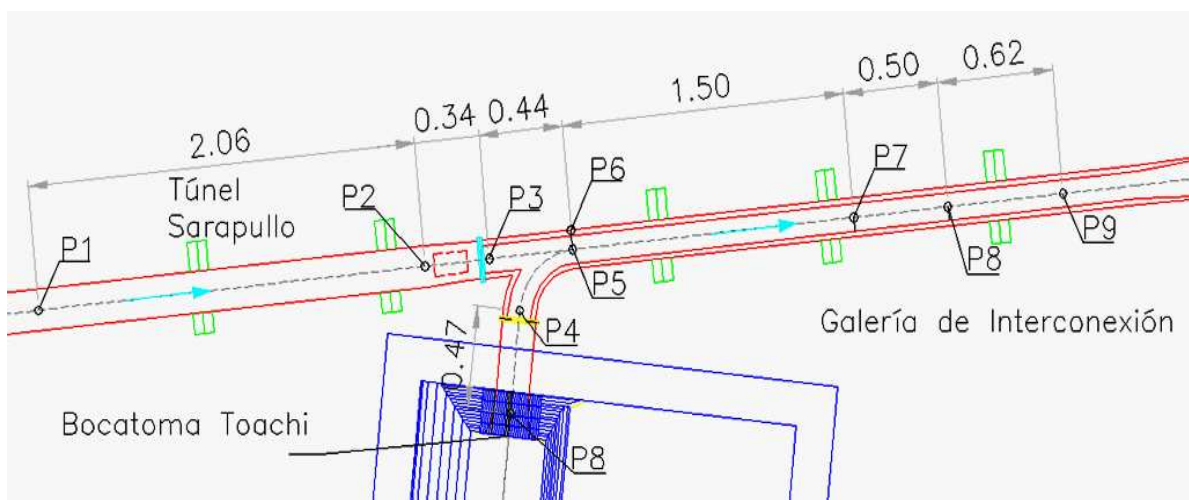
Sarapullo como en el embalse de la presa Toachi, así como en las diferentes secciones transversales del sistema hidráulico modelado.

Con la ayuda de trazadores se mejora la visualización del patrón de flujo que se presenta en cada una de las pruebas. Esto permite llevar un registro fotográfico y de video. Finalmente, la evaluación de los niveles de energía en las secciones de interés del sistema hidráulico de la estructura de unión, se lo realiza numéricamente.

6.1.2 PLAN DE PRUEBAS CON DISEÑO ORIGINAL

Las mediciones de los niveles piezométricos se toman en secciones específicas del modelo de estructura de Unión Sarapullo – Toachi. En la Figura No. 6.1 se presenta el esquema de localización de los puntos de medición.

FIGURA No. 6.1: Ubicación de puntos de medición de niveles piezométricos



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

En el Cuadro No. 6.1 se muestra el listado del plan de pruebas para el análisis experimental del comportamiento del flujo en el interior de la unión con el diseño original.

CUADRO No. 6.1: Plan de pruebas con el diseño original.

Escenario	Tramo	Q_p	Q_m	OBSERVACIONES
		(m^3/s)	(lt/s)	
1	Sarapullo (Q_S)	40.0	22.4	Trabajando tres turbinas en Sarapullo, funcionando tres turbinas con el caudal de diseño en Alluriquín
	Toachi (Q_T)	64.1	35.9	
	Galería (Q_G)	104.1	58.2	
2	Sarapullo (Q_S)	6.0	3.4	Trabajando al 45% una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina al 45% en Alluriquín
	Toachi (Q_T)	13.1	7.3	
	Galería (Q_G)	19.1	10.7	
3	Sarapullo (Q_S)	13.3	7.5	Trabajando una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina en Alluriquín
	Toachi (Q_T)	24.1	13.5	
	Galería (Q_G)	37.5	20.9	
4	Sarapullo (Q_S)	26.7	14.9	Trabajando dos turbinas en Sarapullo, funcionando dos turbinas en Alluriquín
	Toachi (Q_T)	44.1	24.7	
	Galería (Q_G)	70.8	39.6	
5	Sarapullo (Q_S)	6.0	3.4	Trabajando el 45% de una turbina en Sarapullo, funcionando una turbina en Alluriquín
	Toachi (Q_T)	31.5	17.6	
	Galería (Q_G)	37.5	20.9	
6	Sarapullo (Q_S)	13.3	7.5	Trabajando una turbina en Sarapullo, funcionando dos turbinas en Alluriquín
	Toachi (Q_T)	57.5	32.1	
	Galería (Q_G)	70.8	39.6	
7	Sarapullo (Q_S)	26.7	14.9	Trabajando dos turbinas en Sarapullo, funcionando dos turbinas con el caudal de diseño y una tercera al 60%
	Toachi (Q_T)	64.1	35.9	
	Galería (Q_G)	90.8	50.8	
8	Sarapullo (Q_S)	6	3.4	Trabajando al 45% una turbina en Sarapullo, funcionando tres turbinas en Alluriquín
	Toachi (Q_T)	98.14	54.9	
	Galería (Q_G)	104.1	58.2	
9	Sarapullo (Q_S)	0.0	0.0	Funcionamiento de tres turbinas con el caudal de diseño, en Alluriquín (captado únicamente del embalse Toachi)
	Toachi (Q_T)	104.1	58.2	
	Galería (Q_G)	104.1	58.2	

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

6.1.3 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN LAS PRUEBAS DEL MODELO FÍSICO CON DISEÑO ORIGINAL

Una vez realizadas las pruebas de los nueve escenarios de operación, se presenta en el Cuadro No. 6.2 la comparación entre los valores de los caudales medidos y los esperados en prototipo:

CUADRO No. 6.2: Caudales ensayados con Diseño original y su comparación con los valores esperados.

Escenario	Tramo	Q_m	Q_p	Q_p (Esperado)	% Diferencia
		(lt/s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	
1	Sarapullo (Q_S)	22.13	39.60	40.0	1
	Toachi (Q_T)	35.84	64.12	64.1	0
	Galería (Q_G)	57.98	103.72	104.1	0
2	Sarapullo (Q_S)	3.32	5.95	6.0	1
	Toachi (Q_T)	7.31	13.07	13.1	1
	Galería (Q_G)	10.63	19.02	19.1	1
3	Sarapullo (Q_S)	7.44	13.31	13.3	0
	Toachi (Q_T)	13.55	24.24	24.1	0
	Galería (Q_G)	20.99	37.55	37.5	0
4	Sarapullo (Q_S)	14.98	26.80	26.7	1
	Toachi (Q_T)	24.60	44.01	44.1	0
	Galería (Q_G)	39.59	70.81	70.8	0
5	Sarapullo (Q_S)	3.32	5.95	6.0	1
	Toachi (Q_T)	17.55	31.39	31.5	0
	Galería (Q_G)	20.87	37.34	37.5	0
6	Sarapullo (Q_S)	7.41	13.25	13.3	1
	Toachi (Q_T)	32.06	57.35	57.5	0
	Galería (Q_G)	39.47	70.60	70.8	0
7	Sarapullo (Q_S)	14.98	26.80	26.7	1
	Toachi (Q_T)	35.91	64.23	64.1	0
	Galería (Q_G)	50.89	91.04	90.8	0
8	Sarapullo (Q_S)	3.57	6.39	6	6
	Toachi (Q_T)	54.94	98.28	98.1	0
	Galería (Q_G)	58.51	104.66	104.1	1
9	Sarapullo (Q_S)	0.00	0.00	0.0	-
	Toachi (Q_T)	58.53	104.70	104.1	1
	Galería (Q_G)	58.53	104.70	104.1	1

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

En todos los escenarios se tienen variaciones de máximo 1% entre el caudal esperado y el caudal puesto en cada una de las pruebas del modelo, a excepción del Escenario No. 8, donde se tiene una variación del 6% del caudal proveniente del túnel de descarga Sarapullo, pero este valor está dentro de los límites aceptables.

6.1.3.1 Análisis de los patrones de flujo observados.

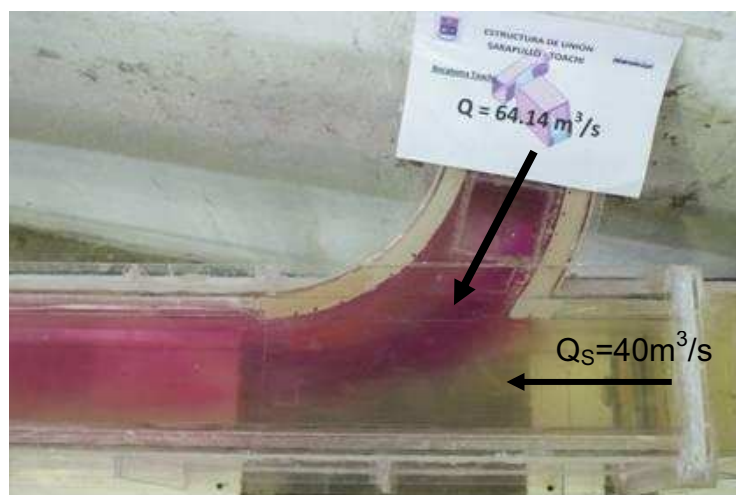
En cada una de las pruebas realizadas se visualizó el comportamiento del flujo a través de las diferentes estructuras que conforman el modelo, especialmente durante el proceso de mezcla de los flujos provenientes del túnel de descarga Sarapullo y la bocatoma de la Presa Toachi hasta su homogenización y, finalmente, el paso del caudal combinado a través de la galería de interconexión. Para diferenciar el paso de cada uno de los flujos por la estructura de unión, se inyectó como trazador de flujo una solución de permanganato de potasio, dándole una coloración rojiza oscura al fluido.

En las pruebas se observa que el espacio ocupado por cada uno de los flujos en la sección transversal de la galería de interconexión, difiere en cada escenario según la relación de caudales de los dos flujos de aproximación. En las siguientes fotografías se presentan la distribución de los dos caudales en la estructura de unión para cada uno de los escenarios estudiados:

6.1.3.1.1 Escenario 1: $Q_S = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_T = 64.1 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_G = 104.1 \text{ m}^3/\text{s}$

Este escenario corresponde a los caudales de diseño de la estructura de unión, es decir, cuando funcionan al 100% las Centrales Sarapullo y Alluriquín.

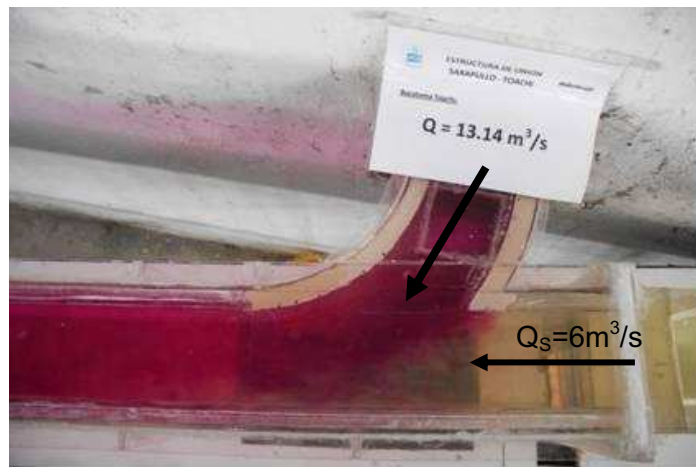
FOTOGRAFÍA No. 6.1: Escenario No. 1, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.38$; $Q_T/Q_G = 0.62$.



6.1.3.1.2 Escenario 2: $Q_S = 6 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_T = 13.1 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_G = 16.1 \text{ m}^3/\text{s}$

Este escenario corresponde a los caudales mínimos de operación del sistema, es decir trabajando al 45 % una turbina en Sarapullo y una turbina al 45 % en Alluriquín.

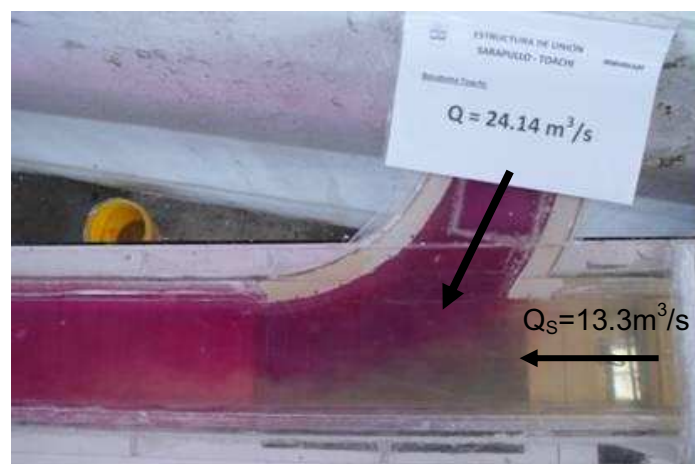
FOTOGRAFÍA No. 6.2: Escenario No. 2, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.31$;
 $Q_T/Q_G = 0.69$.



6.1.3.1.3 Escenario 3: $Q_S = 13.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_T = 24.1 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_G = 37.5 \text{ m}^3/\text{s}$

Este escenario corresponde a los caudales del sistema cuando se encuentre trabajando con una turbina en Sarapullo y una turbina en Alluriquín.

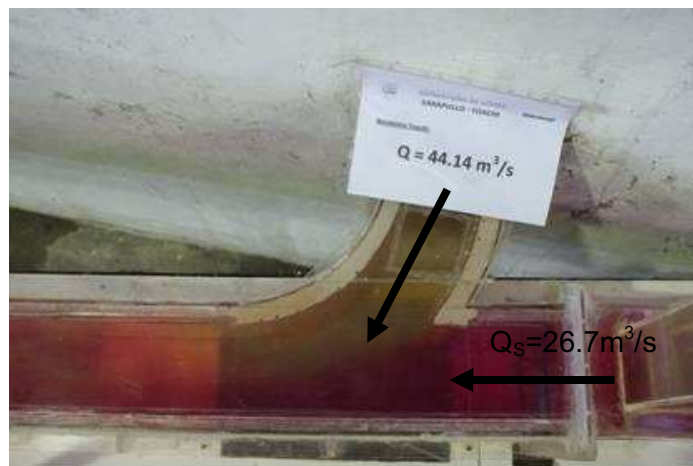
FOTOGRAFÍA No. 6.3: Escenario No. 3, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.36$;
 $Q_T/Q_G = 0.64$.



6.1.3.1.4 Escenario 4: $Q_S = 26.67 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_T = 44.1 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_G = 70.8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Este escenario corresponde a los caudales del sistema cuando se encuentre trabajando con dos turbinas en Sarapullo y dos turbinas en Alluriquín.

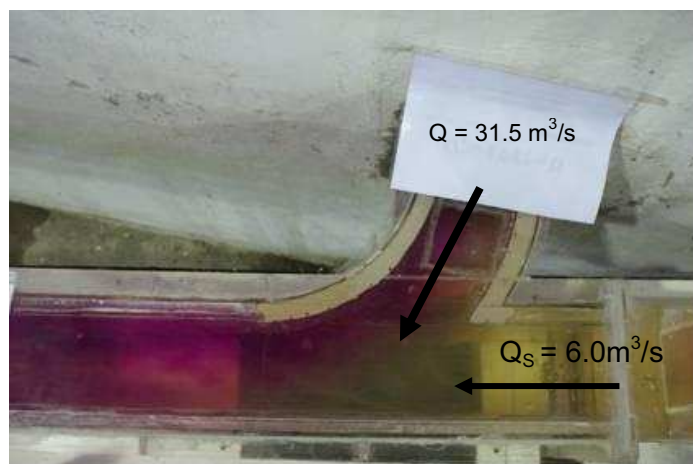
FOTOGRAFÍA No. 6.4: Escenario No. 4, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.38$;
 $Q_T/Q_G = 0.62$.



6.1.3.1.5 Escenario 5: $Q_S = 6 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_T = 31.5 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_G = 37.5 \text{ m}^3/\text{s}$

Este escenario corresponde a los caudales del sistema cuando se encuentre trabajando con una turbina al 45% en Sarapullo y una turbina en Alluriquín.

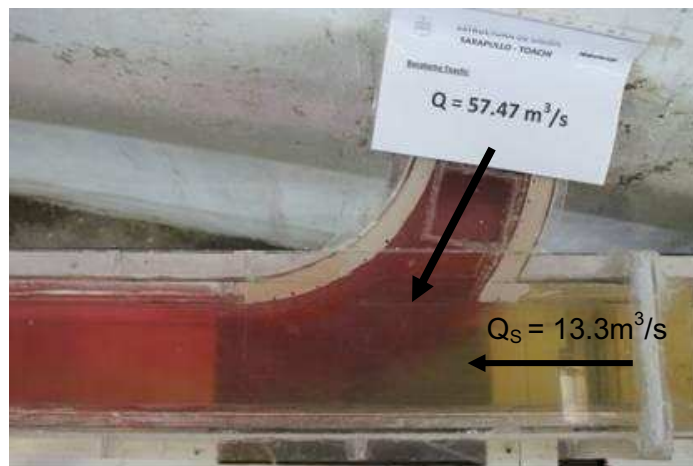
FOTOGRAFÍA No. 6.5: Escenario No. 5, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.16$;
 $Q_T/Q_G = 0.84$.



6.1.3.1.6 Escenario 6: $Q_S = 13.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_T = 57.5 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_G = 70.8 \text{ m}^3/\text{s}$

Este escenario corresponde a los caudales del sistema cuando se encuentre trabajando con una turbina en Sarapullo y dos turbinas en Alluriquín.

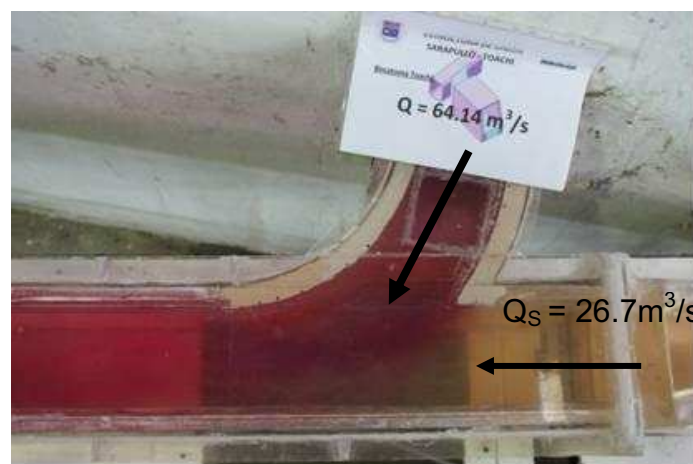
FOTOGRAFÍA No. 6.6: Escenario No. 6, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.19$;
 $Q_T/Q_G = 0.81$.



6.1.3.1.7 Escenario 7: $Q_S = 26.67 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_T = 64.1 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_G = 90.8 \text{ m}^3/\text{s}$

Este escenario corresponde a los caudales del sistema cuando se encuentre trabajando con dos turbinas en Sarapullo y dos turbinas al 100% y una turbina al 60% en Alluriquín.

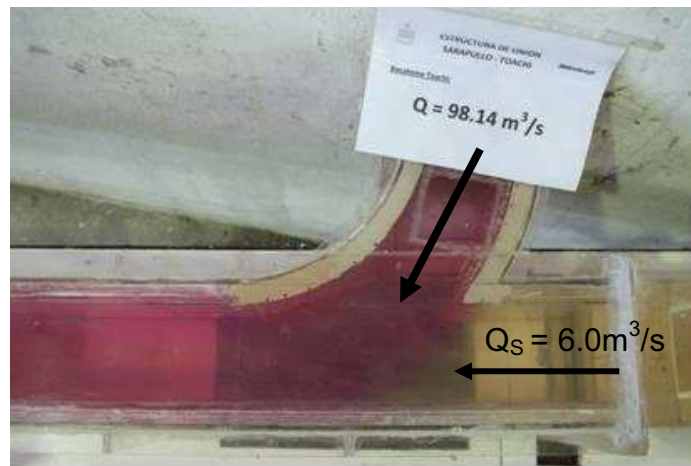
FOTOGRAFÍA No. 6.7: Escenario No. 7, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.29$;
 $Q_T/Q_G = 0.71$.



6.1.3.1.8 Escenario 8. $Q_S=6\text{ m}^3/\text{s} - Q_T=98.1\text{ m}^3/\text{s} - Q_G=104.1\text{ m}^3/\text{s}$

Este escenario corresponde a los caudales del sistema cuando se encuentre trabajando con una turbina al 45% en Sarapullo y tres turbinas al 100% en Alluriquín.

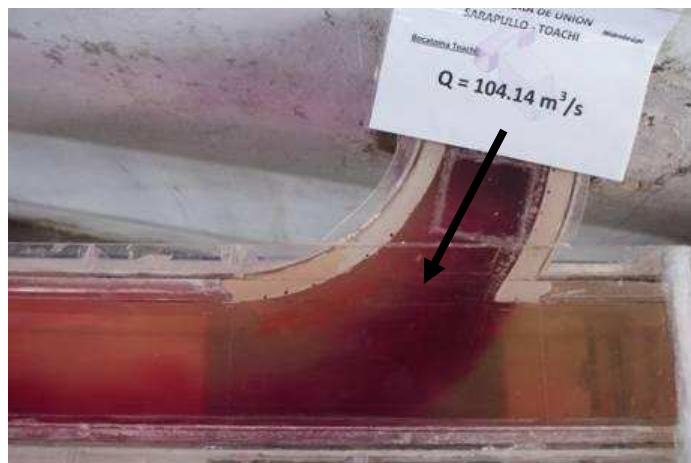
FOTOGRAFÍA No. 6.8: Escenario No. 8, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.06$;
 $Q_T/Q_G = 0.94$.



6.1.3.1.9 Escenario 9: $Q_S=0\text{ m}^3/\text{s} - Q_T=104.1\text{ m}^3/\text{s} - Q_G=104.1\text{ m}^3/\text{s}$

Este escenario corresponde a los caudales del sistema cuando se encuentre trabajando con una turbina al 45% en Sarapullo y tres turbinas al 100% en Alluriquín.

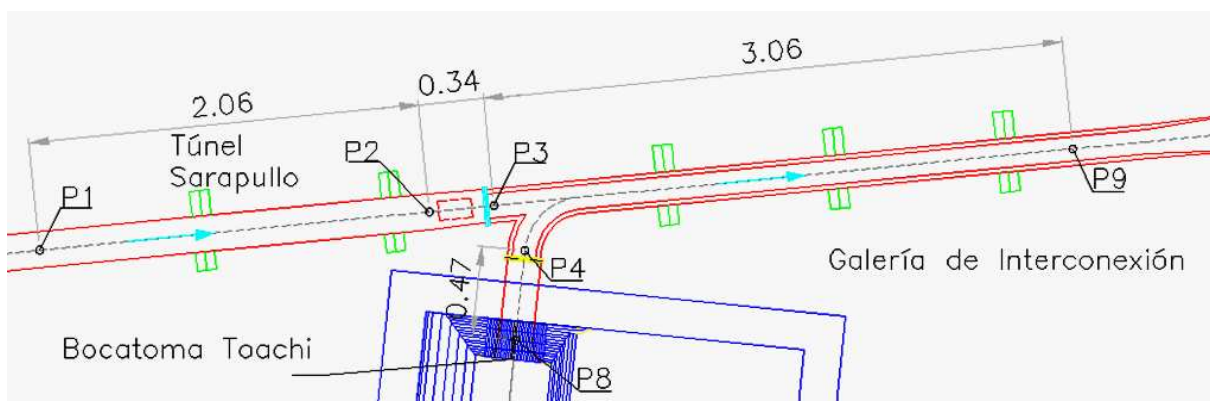
FOTOGRAFÍA No. 6.9: Escenario No. 9, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0$; $Q_T/Q_G = 1$.



6.1.3.2 Coeficiente de Pérdida Localizada de Energía en la Estructura de Unión

Los puntos de medición que intervienen en el cálculo de los coeficientes de pérdida local se presentan en la Figura No. 6.2.

FIGURA No. 6.2: Ubicación de puntos de medición de niveles piezométricos



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

El cálculo del coeficiente de pérdida local de energía en la estructura de unión se efectúa en los dos tramos que conforman la misma, es decir, el tramo correspondiente al flujo proveniente del túnel de descarga Sarapullo después de la compuerta del pozo Sarapullo (3) hasta la salida de la estructura de unión (5) en la galería de interconexión de la presa y la segunda después de la compuerta que se encuentra aguas abajo de la entrada de la bocatoma de la presa Toachi (4) hasta la salida de la estructura de unión (5).

Inicialmente se calculó el coeficiente de pérdida por medio de la diferencia de los niveles de energía obtenidas en base a las lecturas de los piezómetros 3, 4 y 5; esta diferencia representa la pérdida de energía producida en los tramos 3 – 5 y 4 – 5, en los cuales obtenemos los coeficientes k_{35} y k_{45} . Después del procesamiento de los resultados alcanzados en la pruebas se obtuvo valores no coherentes, debido a que el punto de medición (5) se encuentra muy cercano a la unión de los fluidos y aún no se tiene una mezcla homogénea, es decir la distribución de velocidades en esta sección de control no es uniforme, es por eso que para mejorar los valores obtenidos, se calcula los coeficientes k_{35} y k_{45}

tomando las medidas de los piezómetros 3, 4, 7, 8 y 9. El coeficiente K_{ij} se lo obtiene con la siguiente ecuación:

$$\Delta h_f = \frac{K_{ij}}{A^2 \cdot 2g} \cdot Q^2 \quad (6.1)$$

Para el análisis de los resultados de los coeficientes de pérdida local se los separó en cuatro grupos en función de las relaciones de caudales Q_T/Q_G , en el Cuadro No. 6.3 se presenta la clasificación realizada:

CUADRO No. 6.3: Grupos de análisis en función de la relación (Q_T/Q_G).

Grupo	Escenario	Q_T/Q_G
1	1	0.6
	3	0.6
	4	0.6
2	2	0.7
	7	0.7
3	5	0.8
	6	0.8
4	8	0.9
5	9	-

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Para cada uno de los grupos expuestos anteriormente se obtuvieron valores promedios del k_{39} y k_{49} como resultados de los valores obtenidos de cada uno de los escenarios.

Para el grupo 1, teniendo como escenario representativo al escenario 1 por ser el de los caudales de diseño, se obtuvieron los resultados presentados en los Cuadros No. 6.4 y 6.5.

CUADRO No. 6.4: Variación de k_{39} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 1, 3 y 4.

Escenario	Re	k_{3-9}
1	9.14E+04	0.907
3	3.07E+04	0.907
4	6.19E+04	0.907

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

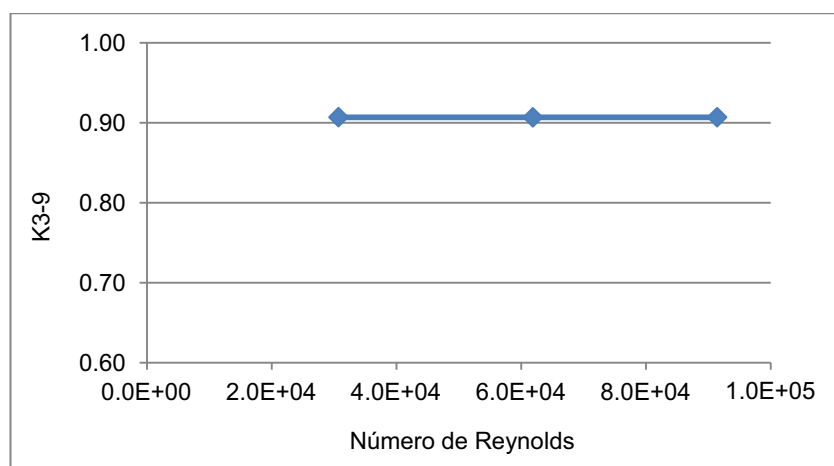
CUADRO No. 6.5: Variación de k_{49} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 1, 3 y 4.

Escenario	Re	k_{4-9} Procesado
1	1.48E+05	0.863
3	5.60E+04	0.863
4	1.02E+05	0.863

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

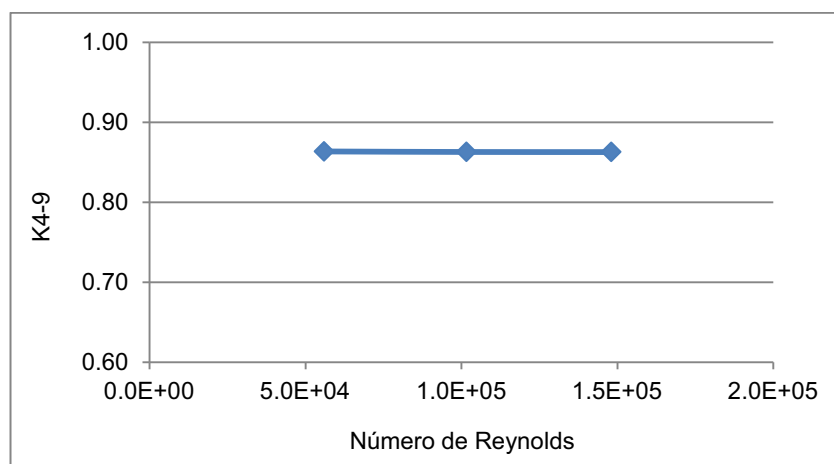
En las Figuras Nos. 6.3 y 6.4 se presenta la variación del coeficiente k_{39} y k_{49} con respecto al número de Reynolds para los escenarios 1, 3 y 4.

FIGURA No. 6.3: Variación k_{39} con respecto a Reynolds, escenarios 1, 3 y 4.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 6.4: Variación k_{49} con respecto a Reynolds, escenarios 1, 3 y 4.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Los escenarios 2 y 7 conforman el grupo 2, y conforman el caso en que las estructuras funcionan con los caudales mínimos de operación. La relación de caudales $Q_T/Q_G = 0.7$ da como resultado los valores indicados en los Cuadros Nos. 6.6 y 6.7.

CUADRO No. 6.6: Variación de k_{39} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 2 y 7.

Escenario	Re	k_{3-9} Procesado
2	1.37E+04	0.74
7	6.19E+04	0.74

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

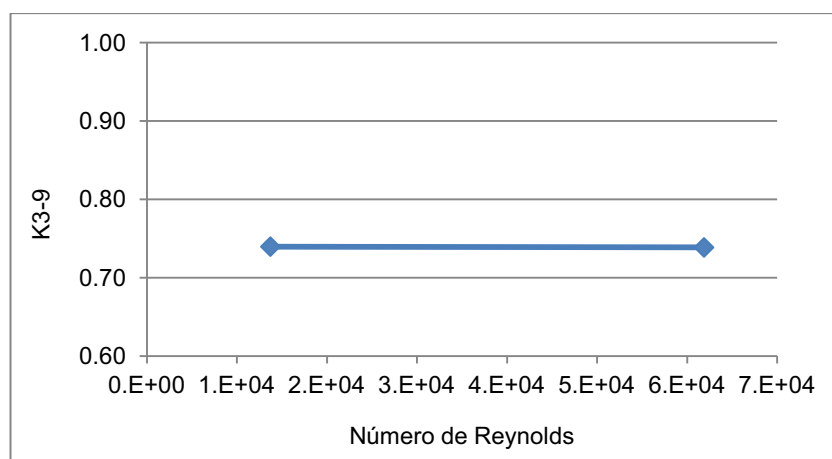
CUADRO No. 6.7: Variación de k_{49} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 2 y 7.

Escenario	Re	k_{4-9} Procesado
2	3.02E+04	0.812
7	1.48E+05	0.812

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

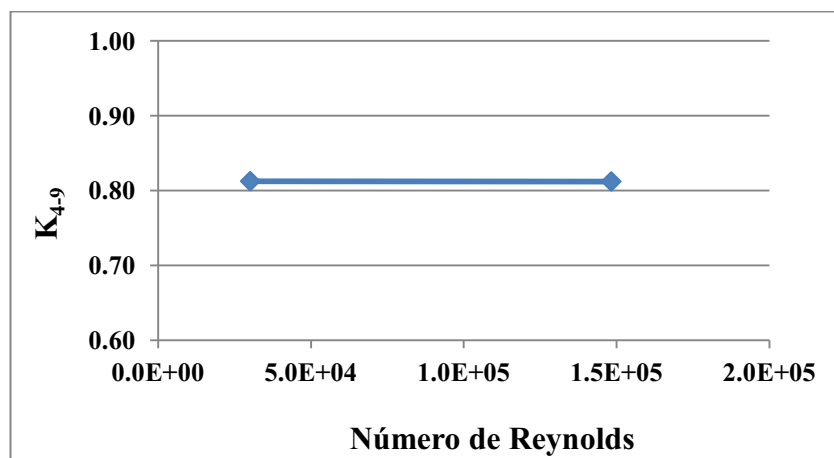
En las Figuras Nos. 6.5 y 6.6 se presenta la variación del coeficiente k_{39} y k_{49} con respecto al número de Reynolds para los escenarios 2 y 7.

FIGURA No. 6.5: Variación de k_{49} con respecto a Reynolds, escenarios 2 y 7.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 6.6: Variación de k_{49} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 2 y 7.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

El tercer grupo está formado por los escenarios 5 y 6, con una relación de caudales $Q_T/Q_G = 0.8$, dando como resultado los valores presentados en los Cuadros Nos. 6.7 y 6.8.

CUADRO No. 6.8: Variación de k_{39} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 2 y 7.

Escenario	Re	K_{3-9} Procesado
5	1.37E+04	1.27
6	3.06E+04	1.27

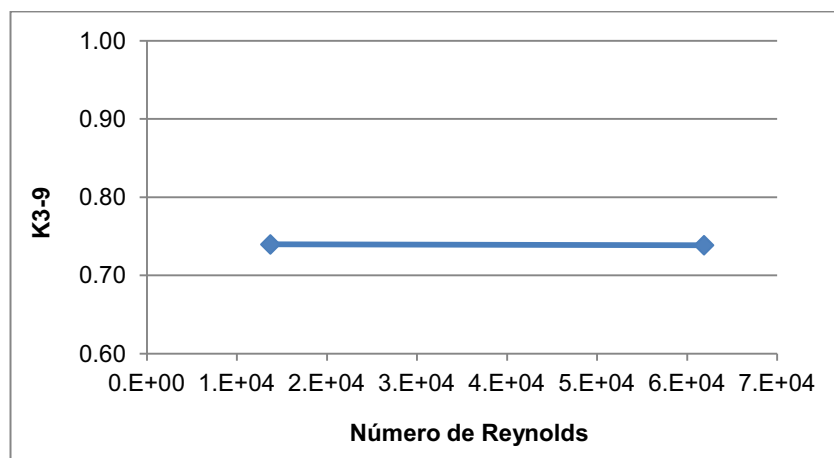
Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

CUADRO No. 6.9: Variación de k_{49} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 2 y 7.

Escenario	Re	K_{4-9} Procesado
5	7.25E+04	0.687
6	1.32E+05	0.687

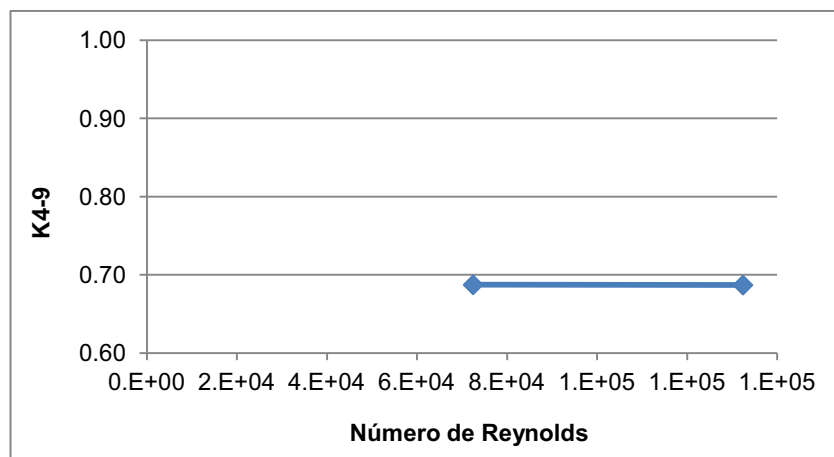
Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 6.7: Variación de k_{39} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 2 y 7.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 6.8: Variación de k_{49} con respecto a Reynolds, escenarios 2 y 7.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

La prueba del escenario 8 fue propuesta para probar el funcionamiento de la estructura de unión cuando por el túnel Sarapullo fluya $6 \text{ m}^3/\text{s}$ (funcionamiento una turbina al 45% en la central Sarapullo) y $98.1 \text{ m}^3/\text{s}$ por la bocatoma de la Presa Toachi sumando un total de 104.1 incluido el caudal ecológico (funcionamiento de tres turbinas al 100 % en la central Alluriquín). En este caso la relación de caudales $Q_T/Q_G = 0.94$. En este escenario se presentan sólo el resultado del coeficiente de pérdida local del tramo 4-9 (Cuadro No. 6.9), debido a

que la relación de caudales Q_T/Q_G es muy grande, lo que produce un efecto de succión en la rama proveniente del Túnel Sarapullo debido al flujo en la rama derivado del embalse de la Presa Toachi, dando lugar a valores negativos del coeficiente de pérdidas k_{39} como consecuencia de la disminución de la presión estática y la baja velocidad en la rama lateral.

En el escenario 9 se tiene el funcionamiento al 100% de las tres turbinas en la central Alluriquín, con la particularidad de que todo el caudal es captado por la bocatoma de la Presa Toachi. Debido a esto, sólo se tienen valores de coeficiente de pérdida local en el tramo 4-9.

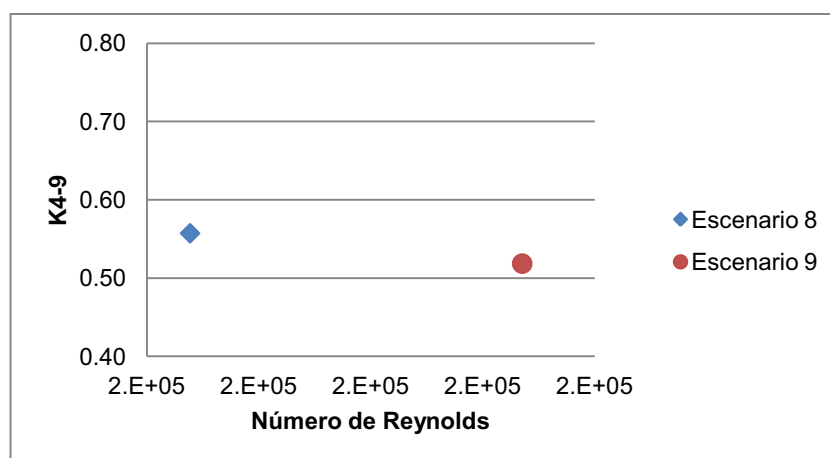
En el Cuadro No. 6.10 y en la Figura No. 6.9 se presentan los resultados obtenidos para estos dos escenarios.

CUADRO No. 6.10: Variación de k_{49} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 8 y 9.

Escenario	Re	K_{4-9} Procesado
8	2.27E+05	0.557
9	2.42E+05	0.519

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 6.9: Variación de k_{49} en función del número de Reynolds, para los escenarios de funcionamiento 8 y 9.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

En el coeficiente de pérdida local tanto para el ramal proveniente del Túnel Sarapullo como para el ramal procedente de la bocatoma de la Presa Toachi, incluye las pérdidas de disipación de energía por la mezcla de los flujos y las pérdidas por fricción que se tiene en los tramos analizados. A partir de la salida de la estructura de unión se tiene 52.3 m hasta el punto de medición 9 (alrededor de 10 veces el diámetro de la galería de interconexión), es por esto que, para el cálculo de los niveles de energía se debe considerar que las pérdidas por fricción en la galería de interconexión deben ser calculadas comenzando en el punto 9.

En todas las pruebas se han evaluado los valores de λ del modelo, tanto del túnel de descarga Sarapullo como los de la galería de interconexión, versus el número de Reynolds. Los valores calculados del coeficiente de fricción se los realizó entre tramos definidos por los puntos de medición instalados en el modelo y mostrados anteriormente en la Figura No. 6.2. En el Cuadro No. 6.11 se presentan los valores obtenidos en el modelo para los diferentes escenarios de operación.

CUADRO No. 6.11: Valores de λ_m para los escenarios de funcionamiento 1, 3, 4, 6, 7 y 8.

Escenario	Tramo	Piezómetro	Q_m		Re	λ_m	
			lt/s	m ³ /s		Experimental	Promedio
1	Sarapullo	1	22.51	40.26	1.3E+05	0.0169	0.0169
		2					
	Galería de Interconexión	5	58.29	104.27	3.1E+05	0.0151	0.0153
		7					
		5	58.29	104.27	3.1E+05	0.0152	
		8					
7	58.29	104.27	3.1E+05	0.0155			
8							
3	Sarapullo	1	7.44	13.31	4.4E+04	0.0262	0.0262
		2					
	Galería de Interconexión	5	20.99	37.55	1.1E+05	0.0187	0.0187
		7					
		5	20.99	37.55	1.1E+05	0.0187	
		8					
7	20.99	37.55	1.1E+05	0.0186			
8							

CUADRO No. 6.11: Continuación.

Escenario	Tramo	Piezómetro	Q _m		Re	λ _m	λ _m
			lt/s	m ³ /s		Experimental	Promedio
4	Sarapullo	1	14.91	26.67	8.7E+04	0.0262	0.0262
		2					
	Galería de Interconexión	5	39.51	70.68	2.1E+05	0.0164	0.0164
		7					
		5	39.51	70.68	2.1E+05	0.0164	
		8					
7	39.51	70.68	2.1E+05	0.0165			
8							
6	Sarapullo	1	7.44	13.31	4.4E+04	0.0259	0.0259
		2					
	Galería de Interconexión	5	39.56	70.77	2.1E+05	0.0164	0.0164
		7					
		5	39.56	70.77	2.1E+05	0.0164	
		8					
7	39.56	70.77	2.1E+05	0.0164			
8							
7	Sarapullo	1	14.91	26.67	8.7E+04	0.0262	0.0262
		2					
	Galería de Interconexión	5	50.69	90.67	2.7E+05	0.0156	0.0156
		7					
		5	50.69	90.67	2.7E+05	0.0156	
		8					
7	50.69	90.67	2.7E+05	0.0156			
8							
8	Sarapullo	1	3.32	5.95	1.9E+04	0.0258	0.0258
		2					
	Galería de Interconexión	5	58.26	104.22	3.1E+05	0.0148	0.0151
		7					
		5	58.26	104.22	3.1E+05	0.0150	
		8					
7	58.26	104.22	3.1E+05	0.0154			
8							

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Adicionalmente, se identificó en el diagrama de Moody, los valores promedios de λ , tanto del Túnel Sarapullo como de la Galería de Interconexión, en función del número de Reynolds.

FIGURA No. 6.10: Diagrama de Moody, Galería de Interconexión.

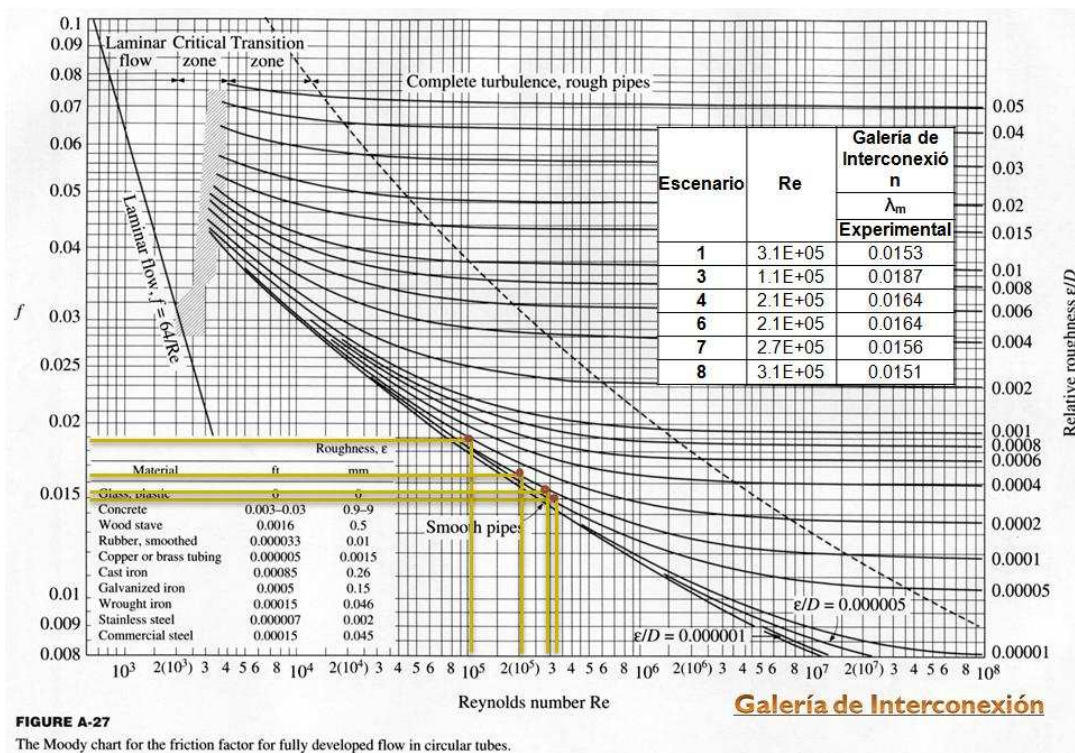


FIGURE A-27

The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 6.11: Diagrama de Moody, Túnel de Descarga Sarapullo.

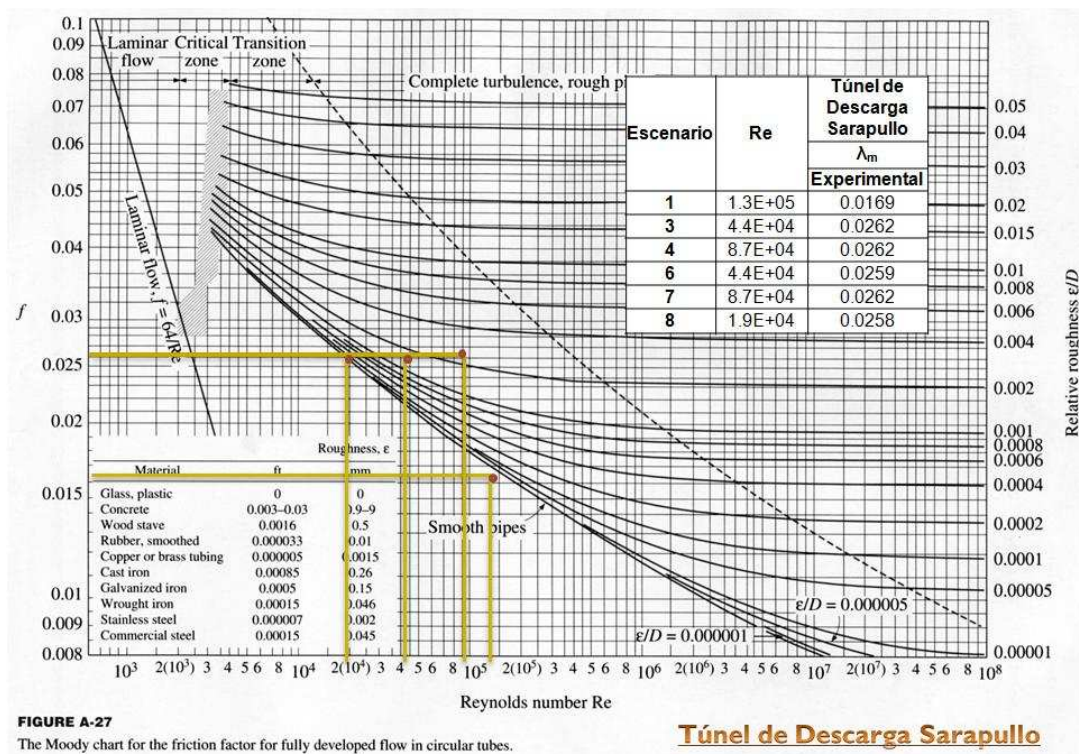


FIGURE A-27

The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

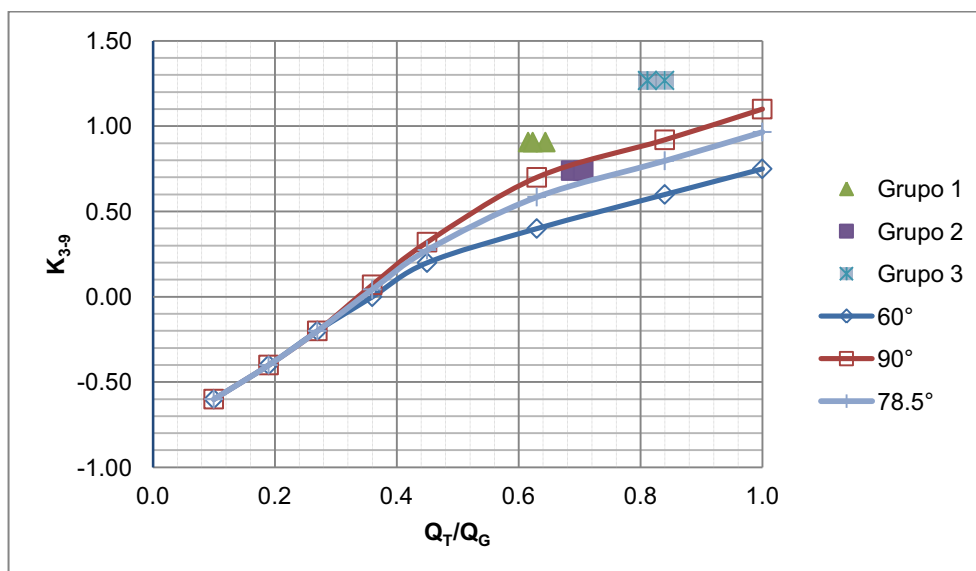
6.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES RESPECTO DE LOS VALORES ESPERADOS.

6.2.1 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN CON LOS VALORES PROPUESTOS POR D. MILLER

A los valores de coeficientes de pérdida local de la estructura de unión obtenidos durante la fase de pruebas del modelo con diseño original se realiza una comparación con los valores teóricos esperados según lo propuesto por D. Miller²⁵.

En las Figuras No. 6.12 y 6.13 se representa la variación de los coeficientes de pérdida para los dos ramales de la estructura de unión respecto a las relaciones de caudales y se realiza una comparación con los valores experimentales obtenidos.

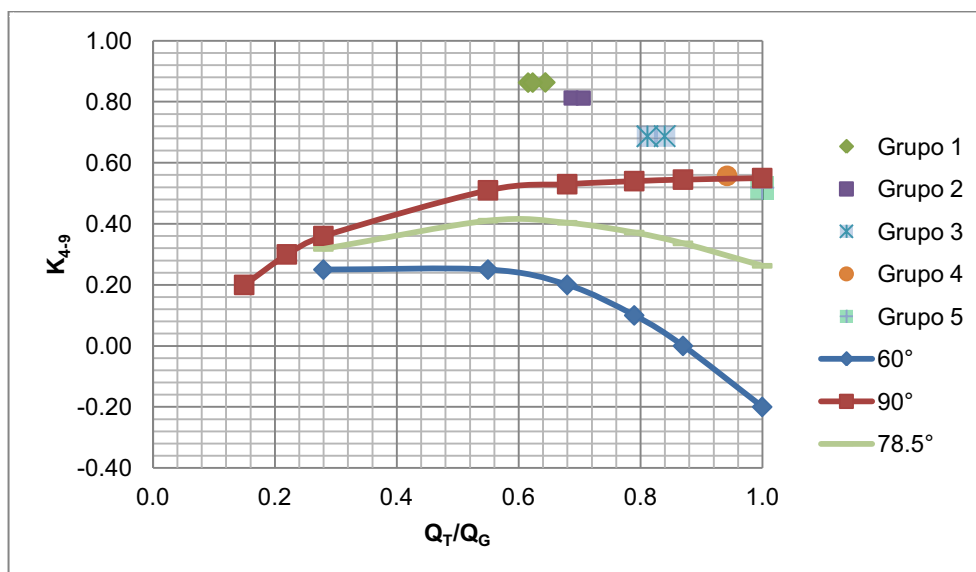
FIGURA No. 6.12: Comparación de los valores experimentales de k_{39} con los recomendados según D. Miller.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

²⁵ "Discharge Characteristics", D.S. Miller, 1994, pág. 190,191

FIGURA No. 6.13: Comparación de los valores experimentales de k_{49} con los recomendados según D. Miller.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Los valores de k_{ij} que se tiene en la literatura antes citada corresponden a uniones de flujo con ángulos de confluencia igual a 60° y 90°. Sin embargo, estos valores han sido tomados como referencia para la comparación de la geometría bajo estudio, en donde el ángulo de confluencia es 78.5°.

Considerando la comparación de los valores de k_{ij} , para k_{39} se puede observar que los resultados obtenidos durante la etapa de pruebas están por encima de los esperados. Esto puede ser justificado ya que la mayoría de los diseñadores suelen utilizar un cierto rango de seguridad en sus coeficientes de cálculo.

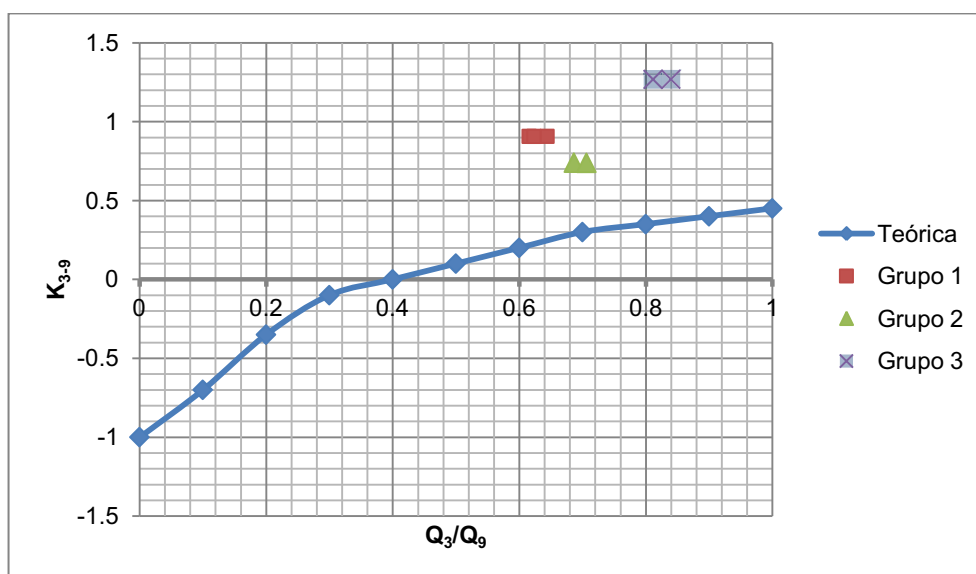
En cuanto al análisis del coeficiente k_{49} , los valores para los grupos 1, 2 y 3 con los derivados de la literatura, se encuentran ligeramente por encima de estos y los valores de los grupos 4 y 5 en contraste a los anteriores se encuentran por debajo de los teóricos, esto se produce debido a que las relaciones de caudales en estos grupos se acercan a la unidad tendiendo a no ser una estructura de interconexión sino más bien un estructura solo con cambio de dirección.

6.2.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN CON LOS VALORES PROPUESTOS POR I'DELCHIK.

Al igual que lo realizado con los valores propuestos por D. Miller en el numeral anterior, se realiza en esta sección una comparación de los resultados obtenidos experimentalmente para el coeficiente de pérdida local de la estructura de unión con los con los valores teóricos propuestos por I'delchik²⁶.

En las Figuras Nos. 6.14 y 6.15 se representa la variación de los coeficientes de pérdida para los dos ramales de la estructura de unión respecto a la relaciones de caudales y se realiza una comparación con los valores experimentales obtenidos.

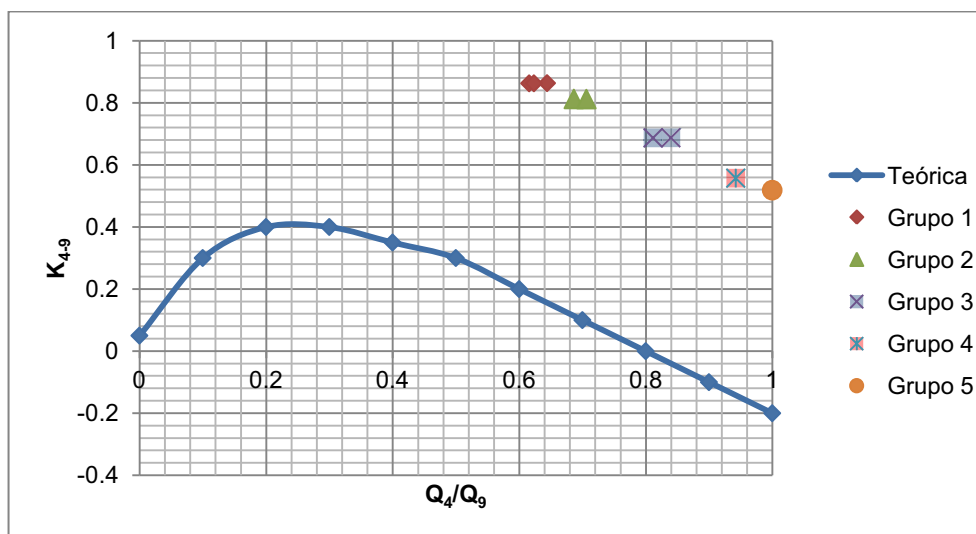
FIGURA No. 6.14: Comparación de los valores experimentales de k_{3-9} con los valores recomendados por I'delchik. Grupos 1, 2 y 3.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

²⁶ "Handbook of Hydraulic Resistance", de I'delchik, pág.354

FIGURA No. 6.15: Variación de coeficientes de pérdida local K_{49} con respecto a relación de caudales, l' delchik. Escenarios 2, 5, 6, 7, 8 y 9.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

6.2.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN (λ) OBTENIDOS EN EL MODELO CON LOS VALORES OBTENIDOS TEÓRICAMENTE.

Para validar los resultados obtenidos en la modelación hidráulica, se realiza adicionalmente la comparación de los valores del coeficiente de fricción (λ) calculado teóricamente con los obtenidos experimentalmente. El análisis se realizó tanto en el túnel de descarga Sarapullo (Cuadro No. 6.12) como en la galería de interconexión (Cuadro No. 6.13).

CUADRO No. 6.12: Comparación de λ teórico y experimental, Túnel de Descarga Sarapullo.

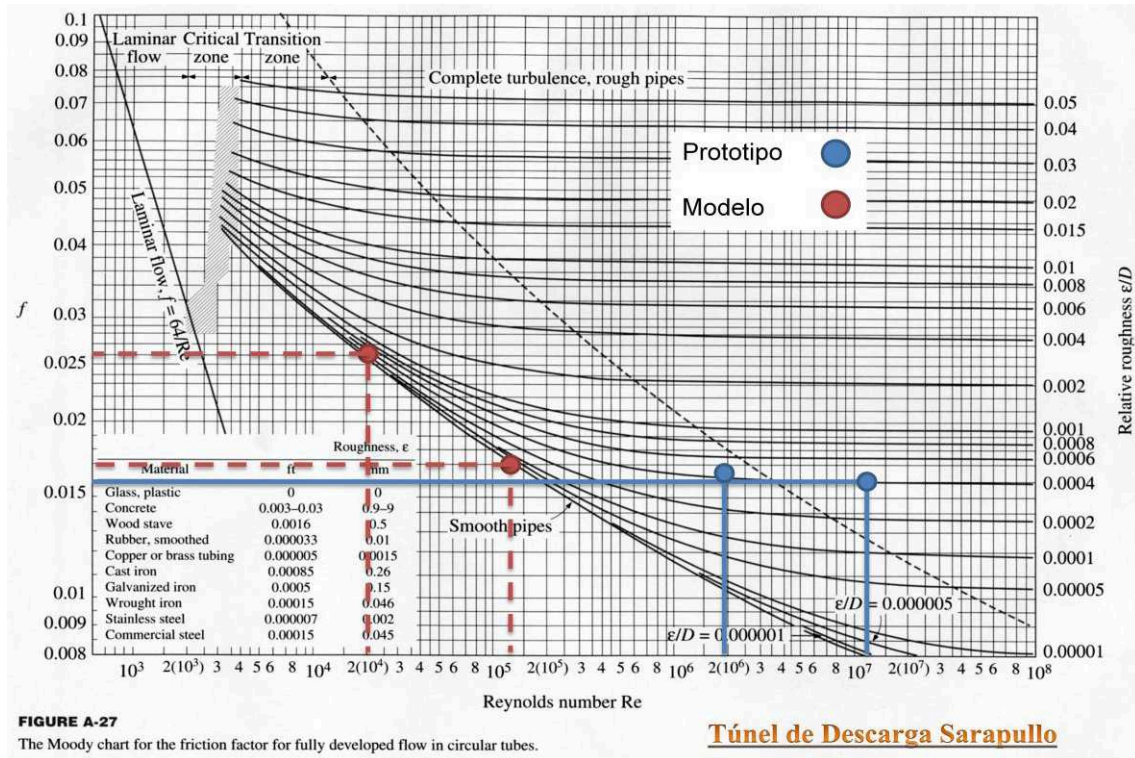
Escenario	Túnel de Descarga Sarapullo					% Diferencia λ_m
	Re_p	λ_p	Re_m	λ_m		
				Teórico	Experimental	
1	1.20E+07	0.0169	1.30E+05	0.0171	0.0169	1
3	3.90E+06	0.017	4.40E+04	0.026	0.0262	0.6
4	7.80E+06	0.0169	8.70E+04	0.026	0.0262	0.8

CUADRO No. 6.12: Continuación.

Escenario	Túnel de Descarga Sarapullo					% Diferencia λ_m
	Re_p	λ_p	Re_m	λ_m		
				Teórico	Experimental	
6	3.90E+06	0.017	4.40E+04	0.026	0.0259	0.4
7	7.80E+06	0.0169	8.70E+04	0.026	0.0262	0.8
8	1.80E+06	0.0172	1.90E+04	0.026	0.0258	0.7

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 6.16: Comparación entre λ teórico y experimental, Túnel de Descarga Sarapullo.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

CUADRO No. 6.13: Comparación de λ teórico y experimental, Galería de Interconexión.

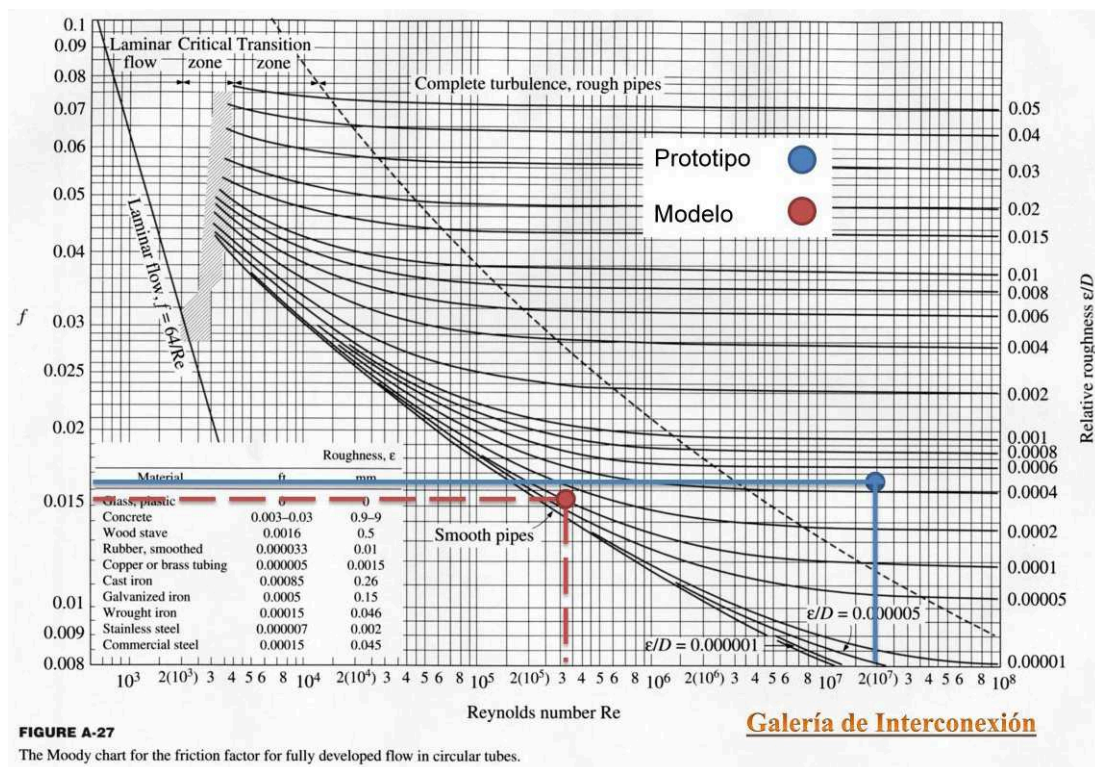
Escenario	Galería de Interconexión					% Diferencia λ_m
	Re_p	λ_p	Re_m	λ_m		
				Teórico	Experimental	
1	2.00E+07	0.0164	3.10E+05	0.0154	0.0153	0.5
3	7.20E+06	0.0165	1.10E+05	0.0189	0.0187	0.8

CUADRO No. 6.13: Continuación.

Escenario	Galería de Interconexión					% Diferencia λ_m
	Re_p	λ_p	Re_m	λ_m		
				Teórico	Experimental	
4	1.40E+07	0.0165	2.10E+05	0.0165	0.0164	0.8
6	1.40E+07	0.0165	2.10E+05	0.0165	0.0164	1.1
7	1.80E+07	0.0164	2.70E+05	0.0158	0.0156	1.3
8	2.00E+07	0.0164	3.10E+05	0.0154	0.0151	1.7

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

FIGURA No. 6.17: Comparación de λ teórico y experimental, Galería de Interconexión.



Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

6.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS VALORES EXPERIMENTALES.

La revisión de los datos recopilados experimentalmente a lo largo de los diferentes escenarios ensayados en el modelo se lo realizó principalmente para la

determinación del coeficiente de pérdida de la estructura de unión. Es por esto que, para la obtención de los resultados expuestos anteriormente, se realizó el cálculo de los coeficientes de pérdida para los dos ramales de la estructura de unión tomando como punto final el punto de medición (9), localizado en la galería de interconexión. Así también, en el proceso de cálculo de cada uno de los coeficientes de pérdida se realizó un análisis de sensibilidad de los datos medidos experimentalmente.

A continuación, en los Cuadros No. 6.14, 6.15 y 6.16, se presentan las variaciones de los niveles de energía que se realizó durante el procesamiento de datos, para la obtención de los coeficientes de pérdida local, en cada uno de los puntos de medición ubicados a lo largo del modelo.

CUADRO No. 6.14: Procesamiento de resultados, escenarios 1 y 3.

Piezómetro	Escenario 1			Escenario 3		
	Nivel de Energía (m)			Nivel de Energía (m)		
	Medido	Procesado	Δ N.E. (mm)	N.E. (m)	N.E. (m)	Δ N.E. (mm)
1	1.918	1.920	1.43	1.899	1.898	1.03
2	1.915	1.914	1.30	1.896	1.897	1.00
3	1.899	1.900	0.49	1.895	1.897	1.50
4	1.914	1.914	0.00	1.897	1.899	1.90
5	1.913	1.916	3.15	1.899	1.900	1.20
6	1.919	1.919	0.00	1.900	1.900	0.00
7	1.901	1.900	0.73	1.898	1.898	0.36
8	1.898	1.894	3.15	1.898	1.897	1.20
9	1.890	1.890	0.00	1.898	1.896	2.00

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

CUADRO No. 6.15: Procesamiento de resultados, escenarios 4 y 6.

Piezómetro	Escenario 4			Escenario 6		
	Nivel de Energía (m)			Nivel de Energía (m)		
	Medido	Procesado	Δ N.E. (mm)	N.E. (m)	N.E. (m)	Δ N.E. (mm)
1	1.944	1.945	0.9	1.94	1.939	0.94
2	1.94	1.941	1	1.938	1.939	0.1
3	1.933	1.936	2.5	1.937	1.939	1.6
4	1.941	1.943	2.4	1.953	1.953	0

CUADRO No. 6.15: Continuación.

Piezómetro	Escenario 4			Escenario 6		
	Nivel de Energía (m)			Nivel de Energía (m)		
	Medido	Procesado	$\Delta_{N.E.}$ (mm)	N.E. (m)	N.E. (m)	$\Delta_{N.E.}$ (mm)
5	1.942	1.945	2.55	1.948	1.95	1.8
6	1.945	1.945	0	1.952	1.952	0
7	1.938	1.937	1.35	1.942	1.942	0.12
8	1.937	1.934	2.5	1.941	1.939	1.76
9	1.933	1.931	2.4	1.938	1.937	1

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

CUADRO No. 6.16: Procesamiento de resultados, escenarios 7 y 8.

Piezómetro	Escenario 7			Escenario 8		
	Nivel de Energía (m)			Nivel de Energía (m)		
	Medido	Procesado	$\Delta_{N.E.}$ (mm)	N.E. (m)	N.E. (m)	$\Delta_{N.E.}$ (mm)
1	1.899	1.900	0.90	1.907	1.907	0.19
2	1.895	1.896	1.00	1.906	1.907	1.00
3	1.888	1.889	0.60	1.906	1.906	0.00
4	1.905	1.906	1.00	1.952	1.954	1.94
5	1.902	1.905	2.99	1.938	1.942	3.99
6	1.908	1.908	0.00	1.951	1.951	0.00
7	1.893	1.892	0.38	1.927	1.927	0.60
8	1.891	1.888	2.99	1.925	1.921	3.99
9	1.886	1.885	1.00	1.916	1.916	0.00

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

Las variaciones de los valores procesados se encuentran cercanos al valor del error que se puede inducir por la apreciación visual (2 - 3 mm), así se validan los valores de coeficientes de pérdida.

Se realizó igual procedimiento con los niveles de energía que intervienen para el cálculo del factor de fricción λ . Los resultados del análisis de sensibilidad realizado en este cálculo se detalla en el Cuadro No. 6.15.

CUADRO No. 6.17: Procesamiento de resultados, coeficiente de fricción (λ).

ESCENARIO	Tramo	Piezómetro	Nivel	Nivel Modificado	Diferencia de Nivel
			cm	cm	mm
1	Sarapullo	1	88.7	88.84	0.006
		2	88.4	88.27	
	Galería de Interconexión	5	83.6	83.92	0.016
		7	82.4	82.33	
		5	83.6	83.92	0.021
		8	82.1	81.79	
		7	82.4	82.33	0.005
8	82.1	81.79			
3	Sarapullo	1	89.6	89.5	0.001
		2	89.3	89.4	
	Galería de Interconexión	5	88.9	89.02	0.003
		7	88.8	88.76	
		5	88.9	89.02	0.003
		8	88.8	88.68	
		7	88.8	88.76	0.001
8	88.8	88.68			
4	Sarapullo	1	93	93.09	0.004
		2	92.6	92.7	
	Galería de Interconexión	5	90.7	90.96	0.008
		7	90.3	90.17	
		5	90.7	90.955	0.011
		8	90.15	89.9	
		7	90.3	90.165	0.003
8	90.15	89.9			
6	Sarapullo	1	93.7	93.61	0.001
		2	93.5	93.51	
	Galería de Interconexión	5	91.3	91.48	0.008
		7	90.7	90.69	
		5	91.3	91.48	0.011
		8	90.6	90.424	
		7	90.7	90.688	0.003
8	90.6	90.424			
7	Sarapullo	1	88.5	88.59	0.004
		2	88.1	88.2	
	Galería de Interconexión	5	84.4	84.7	0.012
		7	83.5	83.46	
		5	84.4	84.699	0.016
		8	83.35	83.051	
		7	83.5	83.462	0.004
8	83.35	83.051			

CUADRO No. 6.17: Continuación.

ESCENARIO	Tramo	Piezómetro	Nivel	Nivel Modificado	Diferencia de Nivel
			cm	cm	mm
8	Sarapullo	1	90.65	90.67	0
		2	90.55	90.65	
	Galería de Interconexión	5	86.2	86.6	0.016
		7	85.1	85.04	
		5	86.2	86.599	0.021
		8	84.9	84.501	
		7	85.1	85.04	0.005
		8	84.9	84.501	

Elaborado por: Lenin Maldonado. Darío Pallares

6.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Como las mediciones se realizan de manera visual y la diferencia de medidas entre los piezómetros son relativamente pequeñas se puede inducir errores en la medición.

En el procesamiento de la información experimental, se considerará que con los caudales bajos el efecto de la resistencia al movimiento en el modelo es relativamente mayor que aquél efecto correspondiente en el prototipo. Sin embargo, este hecho no afectaría al patrón de flujo dominado por las condiciones geométricas de contorno.

Las secciones tanto del Túnel Sarapullo como de la Galería de Interconexión son efectivas para los caudales de diseño. Para los caudales mínimos o bajos, el número de Reynolds disminuye, obteniéndose valores del coeficiente de resistencia altos.

La máxima variación entre los valores obtenidos en base a la literatura técnica y los alcanzados experimentales es del 1.7 %, valor que es aceptable dentro de la modelación hidráulica.

En las figuras anteriores se observa que para las distintas condiciones de funcionamiento tanto del túnel de descarga Sarapullo como la galería de interconexión, los valores de λ_m se encuentran dentro de la condición de tubería lisa. De igual manera se observa que el número de Reynolds presentes en los distintos escenarios supera el valor de 2×10^4 , únicamente en los escenarios 4 y 7 dentro del túnel de descarga Sarapullo el flujo se mantiene en la zona de transición.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN O DE INTERCONEXIÓN.

En la operación del modelo de la estructura de unión Sarapullo – Toachi, para cada escenario de funcionamiento, se concluye:

PRIMERA FASE

Escenario 1:

Las secciones transversales tanto del Túnel Sarapullo como de la Galería de Interconexión son efectivas para los caudales de diseño (máximos). El flujo captado por medio de la bocatoma en el embalse de la Presa Toachi ocupa alrededor de un 70 % de la sección de la Galería de Interconexión. Se produce una mezcla homogénea de ambos flujos de entrada a pocos metros de la salida de la Estructura de Unión, sin presencia de zonas de separación o de reflujos.

Escenario 2:

El flujo proveniente del Túnel Sarapullo es confinado por el flujo captado en la bocatoma del embalse Toachi, hacia la pared lateral de la galería de interconexión, ocupando así la menor proporción de toda la sección transversal (alrededor de un 20 % de la sección). La mezcla de los dos fluidos se realiza a pocos metros de la salida de la estructura de unión. Debido a la baja velocidad del flujo de aproximación desde el Túnel Sarapullo, aparece una mayor resistencia al movimiento en este tramo, comparado con el valor de la resistencia desde el tramo proveniente de la Presa Toachi.

Escenario 3:

El flujo de cada uno de los ramales de la estructura de unión se distribuye de igual forma a lo ancho de la galería, produciéndose la mezcla de forma homogénea a pocos metros de la salida hacia la galería de interconexión. No existe diferencia apreciable entre los niveles de energía de cada uno de los ramales de aproximación a la cámara de interconexión.

Escenario 4:

En la sección de la galería de interconexión, el flujo aparece como una mezcla homogénea a una distancia de unos 10 m aguas abajo de la salida de la estructura de unión, ocupando los dos flujos el ancho de la sección transversal de manera simétrica, es decir, un 50 % cada uno.

Escenario 5:

El flujo proveniente del túnel de descarga Sarapullo se comprime a causa del flujo derivado del embalse Toachi, ocupando aproximadamente un 10% de la sección de la galería de interconexión. La mezcla de los flujos se genera agua abajo de la estructura de unión. El flujo proveniente de la bocatoma del embalse Toachi no choca directamente contra pared de la galería de interconexión debido a la curvatura del diseño geométrico de la estructura de unión y las bajas velocidades de la masa de agua.

Escenario 6:

El flujo captado desde la bocatoma en el embalse Toachi ocupa el mayor porcentaje de la sección transversal (80%) en la galería de Interconexión. Las pérdidas de energía bajo este escenario son relativamente importantes, dada la relación crítica entre los caudales ($Q_T/Q_G = 0.81$, el mayor porcentaje del caudal que pasa por la galería de interconexión es captado por la bocatoma del embalse Toachi). La mezcla de los flujos se realiza a pocos metros de la salida de la estructura de unión.

Escenario 7:

El flujo proveniente de la bocatoma del embalse Toachi ocupa aproximadamente un 80% de la sección de la galería de interconexión, esto, inmediatamente de la Unión. La mezcla ambos flujos se efectúa aguas abajo de la estructura de unión. No existen evidencias del fenómeno de reflujos o zonas de separación.

Escenario 8:

El flujo que se aproxima a la estructura de unión desde el túnel de descarga de la central Sarapullo, se encuentra totalmente comprimido (alrededor de un 95%) hacia un margen de la sección transversal de la Galería de Interconexión. Las pérdidas de energía bajo este escenario son relativamente importantes, dada la relación crítica entre los caudales en comparación con los demás escenarios de operación ($Q_T/Q_G = 0.94$, el mayor porcentaje del caudal que pasa por la galería de interconexión es captado por la bocatoma del embalse Toachi).

Escenario 9:

Debido a que en este escenario, todo el caudal ingresa únicamente desde la bocatoma del embalse Toachi, en el tramo de la estructura de unión correspondiente al túnel de descarga Sarapullo se produce en forma evidente un estancamiento de la masa de agua, el funcionamiento de la estructura de unión pasa a ser únicamente el paso de flujo a través de una curvatura, al cerrarse la compuerta del Túnel de descarga Sarapullo.

La estructura de Unión trabaja con eficiencia debido a la curvatura existente para la introducción del flujo proveniente de la bocatoma ubicada en el embalse de la Presa Toachi además del ángulo existente entre los dos flujos de entrada mencionados, por lo cual se recomienda mantener la geometría de la Unión, ya que sus secciones son adecuadas para su buen funcionamiento, tanto de la interconexión como de los elementos que la componen.

SEGUNDA FASE

Grupo 1

El flujo proveniente de la bocatoma del embalse Toachi ocupa aproximadamente un 70% de la sección de la galería de interconexión. La mezcla de los flujos se efectúa aproximadamente a 7 metros aguas abajo del final de la estructura de unión.

Grupo 2

El flujo de túnel de Descarga Sarapullo ocupa alrededor del 15% de la sección transversal de la galería de interconexión. La mezcla de éste con el caudal captado por la bocatoma de la Presa Toachi de una manera homogénea se realiza a alrededor de 15 metros aguas debajo de la salida de la estructura de unión.

Grupo 3

El flujo proveniente del túnel de descarga Sarapullo ocupa aproximadamente un 20% de la sección de la galería de interconexión. La mezcla de los flujos, tanto de derivado del embalse Toachi como el del túnel de descarga Sarapullo, se efectúa aproximadamente a 13 metros agua abajo del final de la estructura de unión.

Grupo 4 (Escenario 8)

El flujo proveniente de la bocatoma de la Presa Toachi comprime totalmente al flujo que se aproxima desde el túnel de descarga de la central Sarapullo en alrededor de un 95% hacia una margen de la sección transversal de la Galería de Interconexión. Las pérdidas de energía bajo este escenario son relativamente importantes, dada la relación crítica entre los caudales en comparación con los demás escenarios de operación. La mezcla de los flujos se realiza a unos 16 metros aguas abajo de la salida de la estructura de unión.

Se comprueba los valores de coeficientes de pérdida, por lo tanto se mantiene la conclusión de la primera fase en la cual se manifiesta el buen funcionamiento de la Estructura de Unión que enlaza el flujo del Túnel de descarga Sarapullo con el caudal captado por la bocatoma de la Presa Toachi.

Los niveles energéticos que se presentaron en la operación de la estructura de unión se encuentran en el rango de 1.888m y 1.953m en modelo, que representan los niveles de 969.44msnm y 970.74msnm en prototipo respectivamente.

Estos niveles están dentro del rango de niveles máximos y mínimos de operación del embalse, por los que se prueba que el funcionamiento de la estructura de interconexión de las Centrales Sarapullo y Alluriquín garantiza el nivel de sumergencia necesario para el efectivo funcionamiento de la bocatoma de la presa Toachi.

En el modelo estudiado se puede observar que aguas abajo de la estructura de unión se presenta una mezcla homogénea de los flujos a presión con diferentes velocidades que transitan por la bocatoma de la presa Toachi y por el túnel de descarga Sarapullo. Esto se debe a la configuración geométrica de dicha estructura, cuya forma curvilínea de la unión hace que el flujo proveniente de la presa Toachi no obstaculice al flujo que llega a través del túnel de descarga Sarapullo.

En las pruebas realizadas con los diferentes escenarios de operación de la estructura de interconexión de las Centrales Sarapullo y Alluriquín, no se detectó introducción de aire dentro de la estructura o dentro de los elementos que la componen.

De igual forma en todas las pruebas realizadas no se observó la existencia de zonas de separación de flujo o zonas de reflujo.

7.2 CONCLUSIONES SOBRE EL USO DE MODELOS HIDRÁULICOS.

La modelación física sirve como herramienta para el diseño y comprobación de la estructura hidráulica, facilitando la visualización y entendimiento del comportamiento de la misma.

La escala 1:20 seleccionada para este modelo, permite representar de manera apropiada los fenómenos hidráulicos presentes en la estructura, considerando factores de restricción externa, como espacio físico disponible del laboratorio, la capacidad del sistema de bombeo para abastecimiento de agua a los modelos y los criterios de similitud dinámica utilizados.

La experiencia adquirida con la modelación física permite ampliar conocimientos sobre los fenómenos hidráulicos presente en estructuras de unión, lo que hace posibles tener criterio válido y dar opiniones aceptables en el campo de la Ingeniería Hidráulica.

La instrumentación y el equipo utilizados para el modelo, requieren ser manejados de manera adecuada evitando errores y alteraciones de resultados que llevarían a una interpretación equivocada de los fenómenos presentes en la estructura en estudio.

Se debe realizar un análisis numérico previo del posible funcionamiento hidráulico, para que una vez construido el modelo físico sirva como base para la validación de los resultados obtenidos.

7.3 RECOMENDACIONES.

No se recomienda realizar cambios en la configuración geométrica de la estructura de interconexión de las Centrales Sarapullo y Alluriquín y tampoco en los elementos que la componen.

Es recomendable seguir realizando estudios experimentales de estructuras hidráulicas que no se encuentran descritas en la información técnica.

Es recomendable realizar un análisis de sensibilidad con los datos obtenidos en la experimentación, descartando errores al momento de la toma de mediciones, ya sea por la apreciación de la instrumentación o falla del operador.

En base a la experimentación realizada con el modelo físico no se recomienda una operación especial para el efectivo funcionamiento de la estructura de interconexión de las Centrales Sarapullo y Alluriquín.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Castro M., ANÁLISIS DIMENSIONAL Y MODELACIÓN FÍSICA EN HIDRÁULICA, EPN, Facultad de Ingeniería Civil.

Domínguez, F. (1950). HIDRÁULICA Santiago de Chile, Editorial Universitaria.

EPN INFORME TÉCNICO. (2011). ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO, ESCALA 1:20, DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO – TOACHI. Quito (FEBRERO 2011)

Hidalgo M. (2007), INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE MODELOS HIDRÁULICOS Y APLICACIONES BÁSICAS, Quito, EPN.

Idelchik I. (1975). HANBOOK OF HYDRAULIC RESITANCE. Estados Unidos de América. Hemisphere Publishing Cosporation.

Kobus H. (1978). HYDRAULIC MODELLING, DVWW, Mitteilungsheft No. 4.

Miller D. (1994). DISCHARGE CHARACTERISTIC. Alemania. A. A. Balkema.

Naudascher, E. (2000), HIDRÁULICA DE CANALES, México. Limusa-Noriega Editores,

Pérez J. (2006). ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO COMPRESIBLE ESTACIONARIO EN UNIONES DE CONDUCTOS, Colombia. Universidad Politécnica de Cartagena.

Rocha Felices A., HIDRÁULICA DE TUBERÍAS Y CANALES.

Saldarriaga, J. (2003). HIDRÁULICA DE TUBERÍAS, New York – Bogotá, Ed. McGraw Hill.

Sotelo G. (1997). HIDRÁULICA GENERAL VOLUMEN I, México, Limusa Noriega Ed.

Streeter V. (1970). MECÁNICA DE FLUÍDOS, México, McGraw Hill Co.

ANEXOS

ANEXO NO. 1
FOTOGRAFÍAS

CONSTRUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA Y DEL MODELO



Fotografía No. 1: Fundición de pared de tanque de abastecimiento al túnel de descarga Sarapullo.



Fotografía No. 2: Construcción del tanque de abastecimiento para el embalse Toachi.



Fotografía No. 3: Construcción del canal de descarga del modelo.



Fotografía No. 4: Elaboración del modelo de la Galería de Interconexión en material acrílico.



Fotografía No. 5: Montaje de estructuras en acrílico sobre soportes metálicos.



Fotografía No. 6: Mesa de soporte para la estructura de acrílico (galería de interconexión).



Fotografía No. 7: Detalle del modelo en acrílico de la bocatoma desde el embalse Toachi.



Fotografía No. 8: Pozo de descarga del flujo desde el túnel Sarapullo (montado sobre la galería de interconexión).



Fotografía No. 9: Rejilla de entrada en el modelo de la bocatoma desde el embalse Toachi.

FASE DE CALIBRACIÓN DEL MODELO



Fotografía No. 10: Medición volumétrica del caudal desde el canal de descarga.



Fotografía No. 11: Vista frontal del vertedero de medida del caudal hacia el túnel de descarga Sarapullo (ubicado en el Tanque No. 1).



Fotografía No. 12: Vista frontal del vertedero de medida del caudal hacia el embalse Toachi (ubicado en el Tanque No. 2).



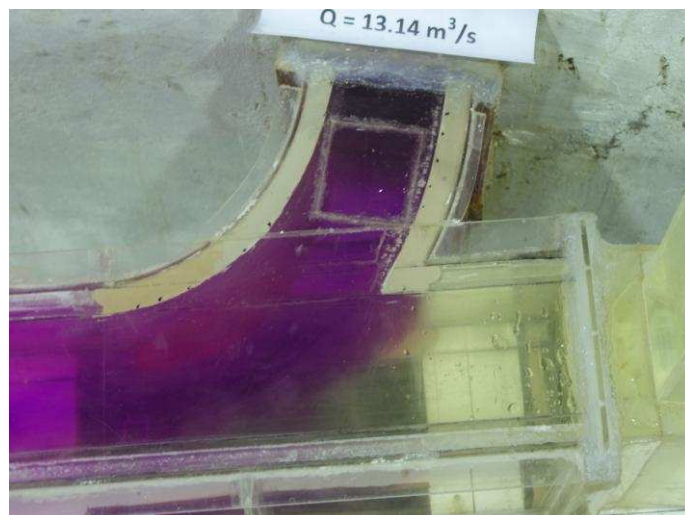
Fotografía No. 13: Vista frontal del vertedero triangular de medida del caudal total (ubicado en el canal de descarga del modelo).

PRUEBAS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO

Prueba No. 1: Escenario No. 2, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.31$; $Q_T/Q_G = 0.69$.

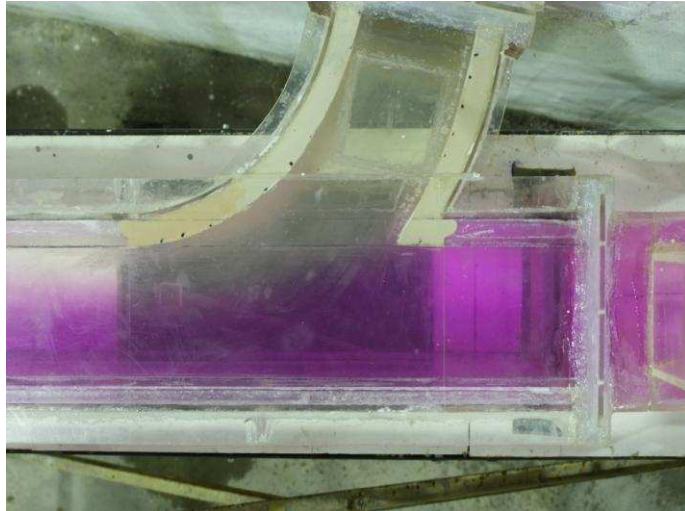


Fotografía No. 14: Características del flujo de aproximación desde el túnel Sarapullo ($Q_S = 6.0 \text{ m}^3/\text{s}$).

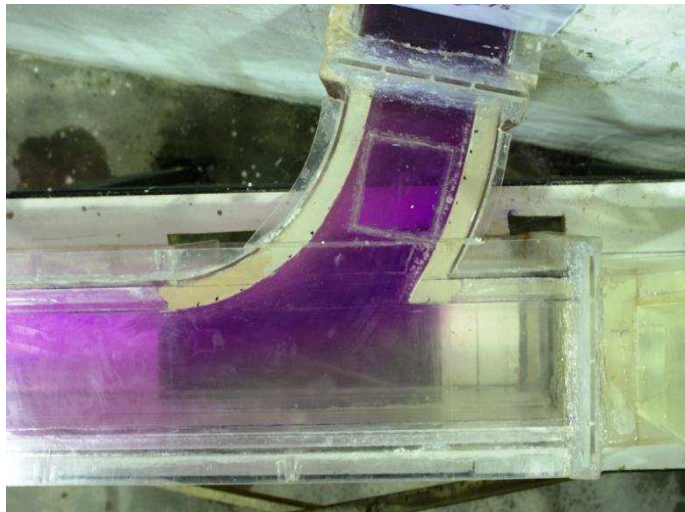


Fotografía No. 15: Características del flujo de entrada desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 13.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 2: Escenario No. 1, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.38$, $Q_T/Q_G = 0.62$.

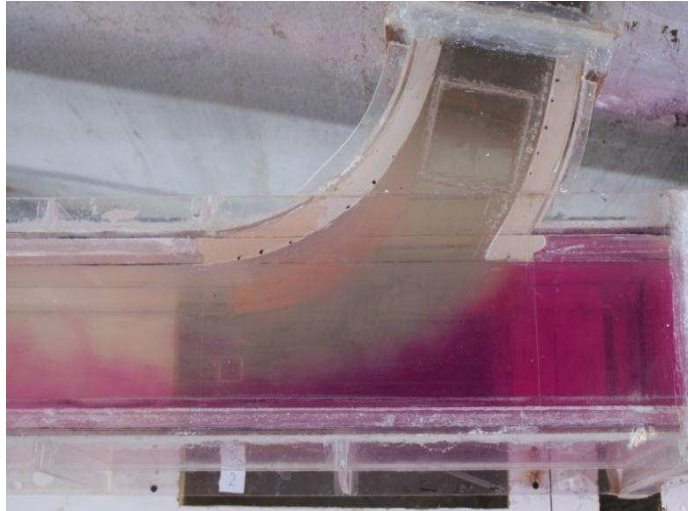


Fotografía No. 16: Características del flujo de aproximación desde el túnel Sarapullo ($Q_S = 40.0 \text{ m}^3/\text{s}$).



Fotografía No. 17: Características del flujo de entrada desde la bocatoma Toachi ($Q_T = 64.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 3: Escenario No. 5, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.16$; $Q_T/Q_G = 0.84$.

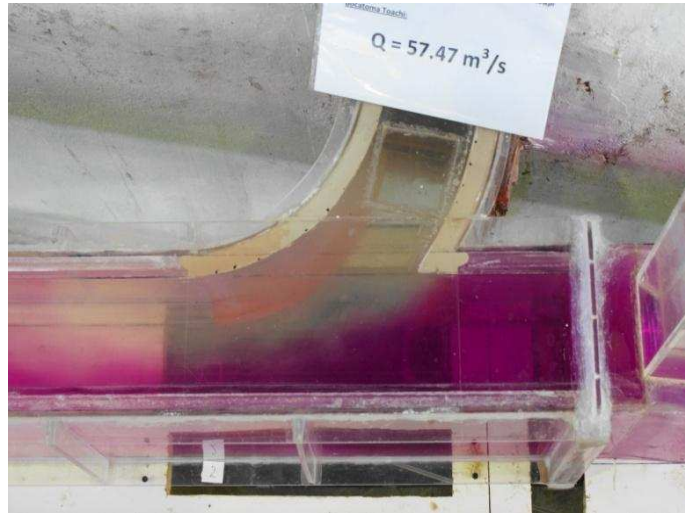


Fotografía No. 18: Características del flujo de aproximación desde el túnel Sarapullo ($Q_S = 6.0 \text{ m}^3/\text{s}$).



Fotografía No. 19: Características del flujo de entrada desde la bocatoma del embalse Toachi ($Q_T = 31.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 4: Escenario No.6, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.19$; $Q_T/Q_G = 0.81$.



Fotografía No. 20: Características del flujo de aproximación desde el túnel Sarapullo ($Q_S = 13.3 \text{ m}^3/\text{s}$).

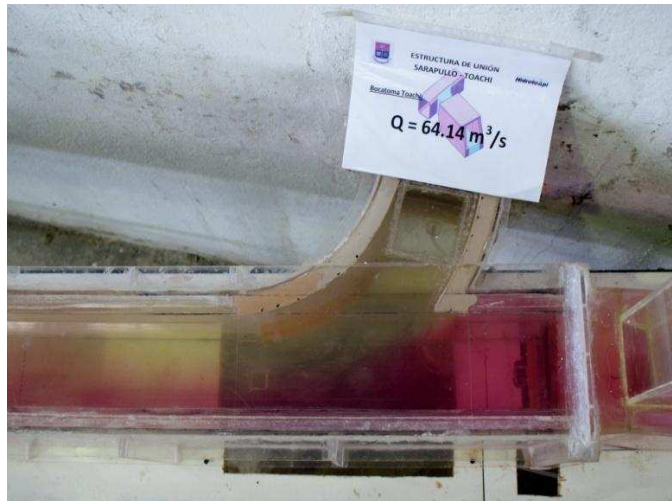


Fotografía No. 21: Características del flujo de entrada desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 57.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - TOACHI

Prueba No. 1: Escenario No. 1, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.38$; $Q_T/Q_G = 0.62$.

Trabajan tres turbinas en la Central Sarapullo y tres turbinas en la Central Alluriquín, todas con el caudal de diseño.



Fotografía No. 22: Características del flujo de aproximación desde el túnel Sarapullo ($Q_S = 40.0 \text{ m}^3/\text{s}$).



Fotografía No. 23: Características del flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 64.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 2: Escenario No. 2, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.31$; $Q_T/Q_G = 0.69$.

Trabaja una turbina en la Central Sarapullo y una turbina en la Central Alluriquín, las dos con el 45% del caudal de diseño.



Fotografía No. 24: Características del flujo de aproximación desde el túnel Sarapullo ($Q_S = 6.0 \text{ m}^3/\text{s}$).



Fotografía No. 25: Características del flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 13.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 3: Escenario No. 3, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.36$; $Q_T/Q_G = 0.64$.

Trabajan una turbina en la Central Sarapullo y una turbina en la Central Alluriquín, cada una con el caudal de diseño.



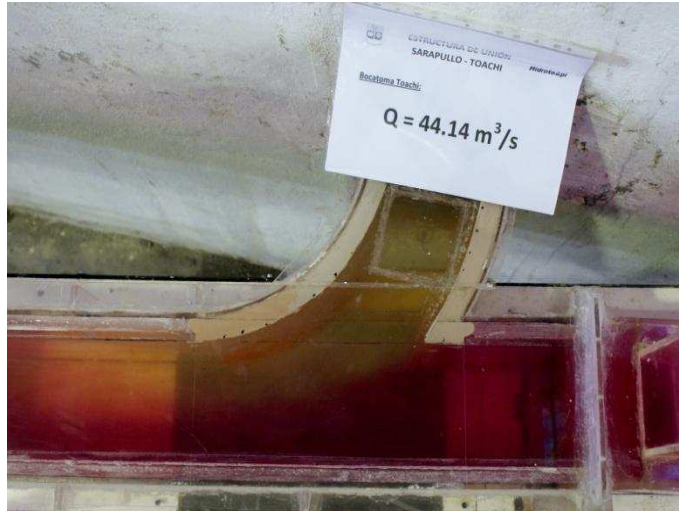
Fotografía No. 26: Características del flujo de aproximación desde el túnel Sarapullo ($Q_S = 13.3 \text{ m}^3/\text{s}$).



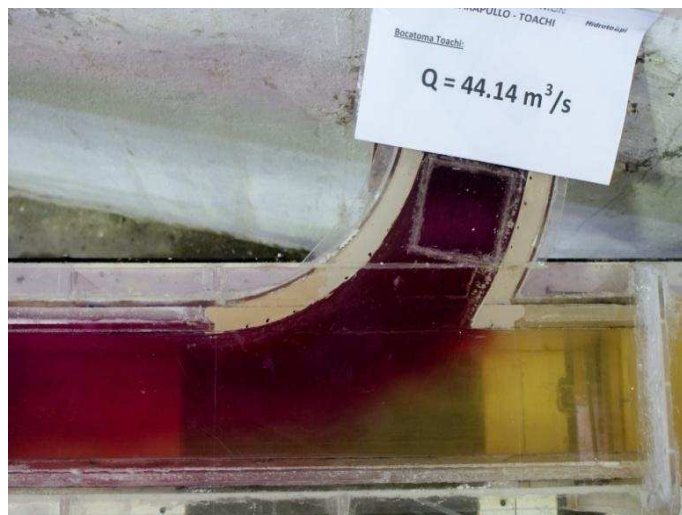
Fotografía No. 27: Características del flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 24.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 4: Escenario No.4, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.38$; $Q_T/Q_G = 0.62$.

Trabajan dos turbinas en la central Sarapullo y dos turbinas en la Central Alluriquín, todas con el caudal de diseño.



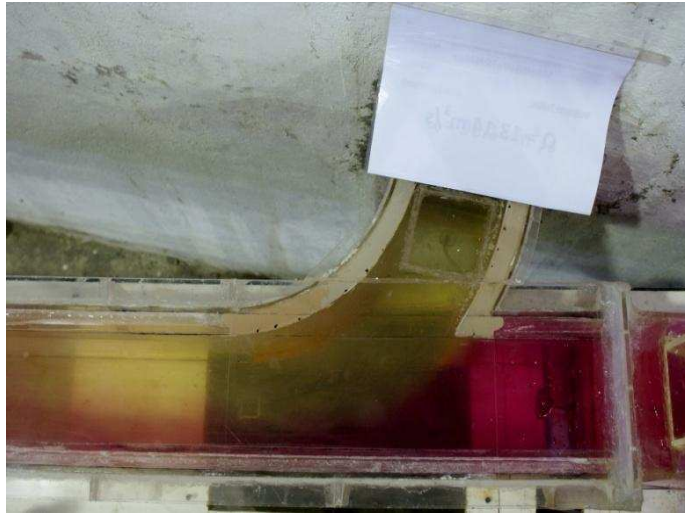
Fotografía No. 28: Características del flujo de aproximación desde el túnel Sarapullo ($Q_S = 26.7 \text{ m}^3/\text{s}$).



Fotografía No. 29: Características del flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 44.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 5: Escenario No. 5, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.16$; $Q_T/Q_G = 0.84$.

Trabaja una turbina en la Central Sarapullo, al 45% del caudal de diseño, y una turbina en la Central Alluriquín, a plena capacidad.



Fotografía No. 30: Características del flujo de aproximación desde el túnel Sarapullo ($Q_S = 6.0 \text{ m}^3/\text{s}$).



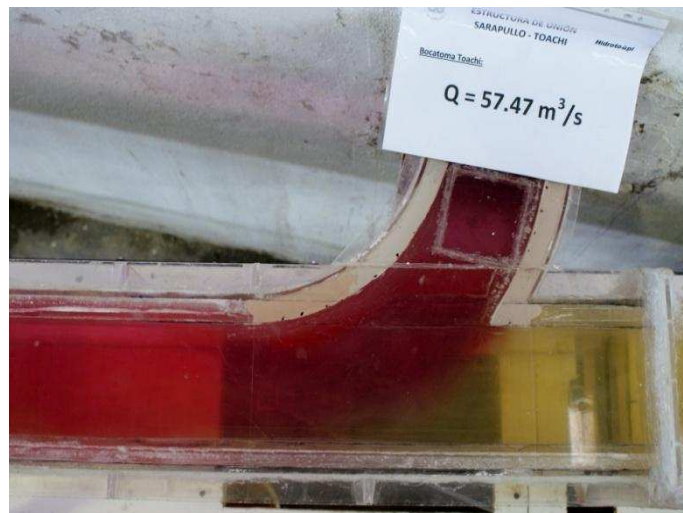
Fotografía No. 31: Características del flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 31.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 6: Escenario No. 6, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.19$; $Q_T/Q_G = 0.81$.

Trabaja una turbina en la Central Sarapullo y funcionando dos turbinas en la Central Alluriquín, a plena capacidad.



Fotografía No. 32: Características del flujo de aproximación desde el túnel Sarapullo ($Q_S = 13.3 \text{ m}^3/\text{s}$).



Fotografía No. 33: Características del flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 57.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 7: Escenario No. 7, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.29$; $Q_T/Q_G = 0.71$.

Funcionan dos turbinas en la Central Sarapullo y dos turbinas en la Central Alluriquín, con el caudal de diseño, y una tercera turbina en la Central Alluriquín con el 60% del caudal de diseño.



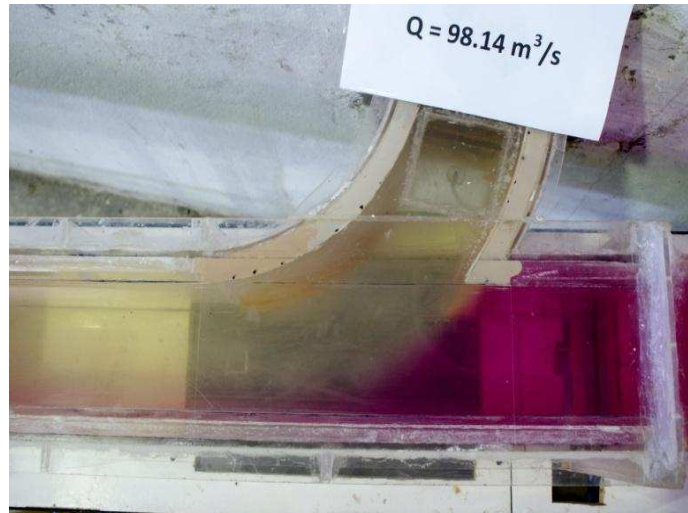
Fotografía No. 34: Características del flujo de aproximación desde el túnel Sarapullo ($Q_S = 26.7 \text{ m}^3/\text{s}$).



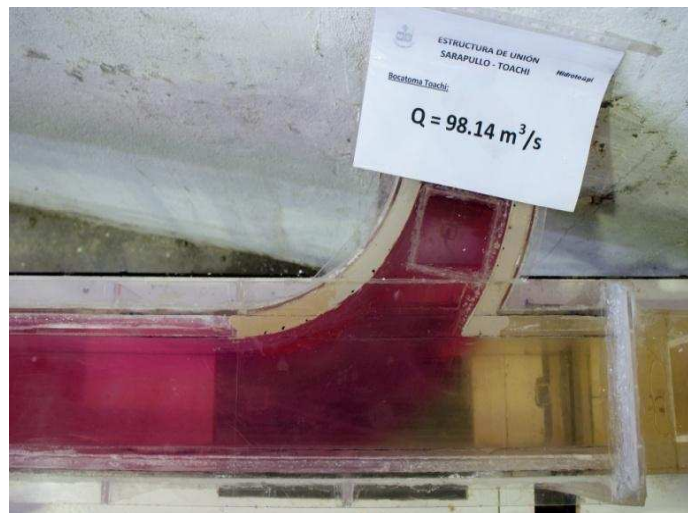
Fotografía No. 35: Características del flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 64.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 8: Escenario No. 8, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.06$; $Q_T/Q_G = 0.94$.

Funcionan una turbina en el Central Sarapullo, con el 45% del caudal de diseño, y tres turbinas en la Central Alluriquín, a plena capacidad.



Fotografía No. 36: Características del flujo de aproximación desde el túnel Sarapullo ($Q_S = 6.0 \text{ m}^3/\text{s}$).



Fotografía No. 37: Características del flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 98.4 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 9: Escenario No. 9, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.00$; $Q_T/Q_G = 1.00$

Operan las tres turbinas de la Central Alluriquín, a plena capacidad, con el caudal de diseño; no existe aporte de caudal desde la Central Sarapullo. Todo el caudal requerido se capta en el embalse Toachi.



Fotografía No. 38: Características del flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 104.7 \text{ m}^3/\text{s}$).

**PRUEBAS COMPLEMENTARIAS CON EL DISEÑO ORIGINAL DE LA
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO – TOACHI**

Prueba No. 1: Escenario No. 1, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.38$; $Q_T/Q_G = 0.62$.



Fotografía No. 39: Características del flujo de aproximación desde el túnel de descarga Sarapullo ($Q_S = 40.0 \text{ m}^3/\text{s}$).



Fotografía No. 40: Estructura de Unión e inicio de la Galería de Interconexión, flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 64.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 2: Escenario No. 3, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.36$; $Q_T/Q_G = 0.64$.



Fotografía No. 41: Estructura de Unión e inicio de la Galería de Interconexión, flujo de aproximación desde el túnel de descarga Sarapullo ($Q_S = 13.3 \text{ m}^3/\text{s}$).



Fotografía No. 42: Características del flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 24.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 3: Escenario No.4, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.38$; $Q_T/Q_G = 0.62$.



Fotografía No. 43: Características del flujo de aproximación desde el túnel de descarga Sarapullo ($Q_S = 26.7 \text{ m}^3/\text{s}$).



Fotografía No. 44: Estructura de Unión e inicio de la Galería de Interconexión, flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 44.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 4: Escenario No. 6, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.19$; $Q_T/Q_G = 0.81$.



Fotografía No. 45: Estructura de Unión e inicio de la Galería de Interconexión, flujo de aproximación desde el túnel de descarga Sarapullo ($Q_S = 13.3 \text{ m}^3/\text{s}$).



Fotografía No. 46: Estructura de Unión e inicio de la Galería de Interconexión, flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 57.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 5: Escenario No. 7, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.29$; $Q_T/Q_G = 0.71$.

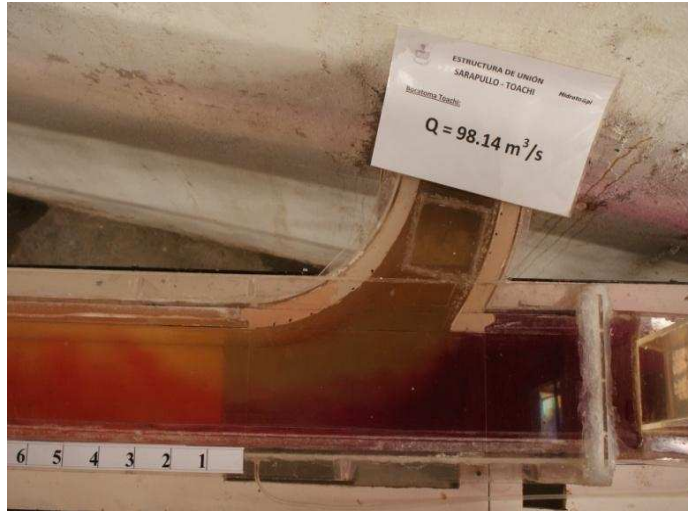


Fotografía No. 47: Características del flujo de aproximación desde el túnel de descarga Sarapullo ($Q_S = 26.7 \text{ m}^3/\text{s}$).



Fotografía No. 48: Estructura de Unión e inicio de la Galería de Interconexión, flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 64.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Prueba No. 6: Escenario No. 8, relación de caudales $Q_S/Q_G = 0.06$; $Q_T/Q_G = 0.94$.



Fotografía No. 49: Características del flujo de aproximación desde el túnel de descarga Sarapullo ($Q_S = 6.0 \text{ m}^3/\text{s}$).

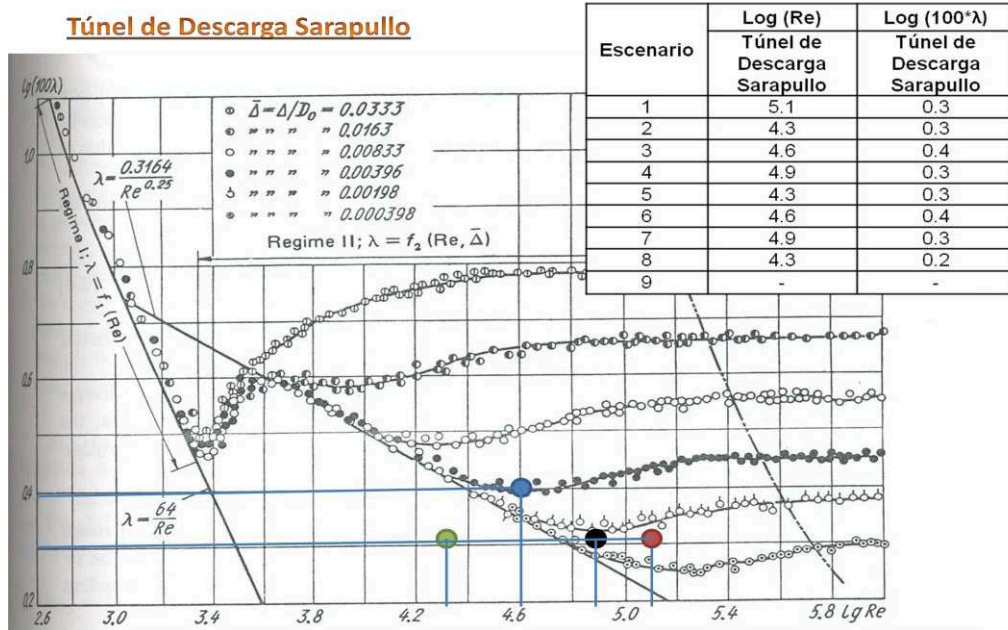


Fotografía No. 50: Estructura de Unión e inicio de la Galería de Interconexión, flujo desde la bocatoma en el embalse Toachi ($Q_T = 98.4 \text{ m}^3/\text{s}$).

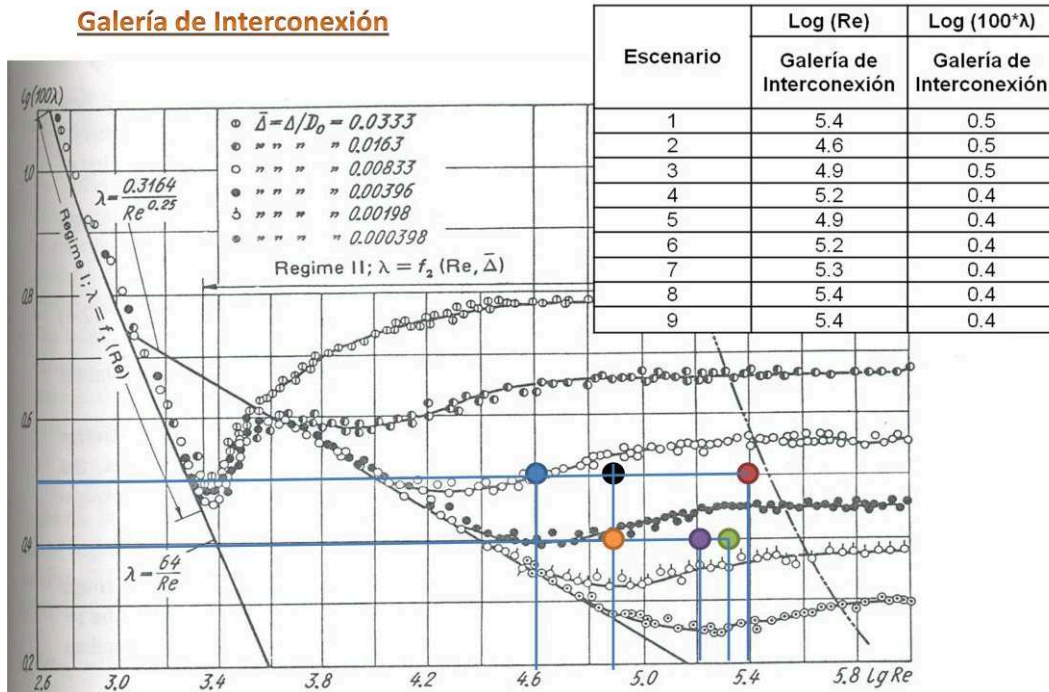
ANEXO NO. 2

GRÁFICOS

FUNCIONALIDAD DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA CON EL NÚMERO REYNOLDS EN TUBERÍAS DE RUGOSIDAD UNIFORME DEL GRANO



Túnel de descarga Sarapullo, valores experimentales de ocho escenarios.



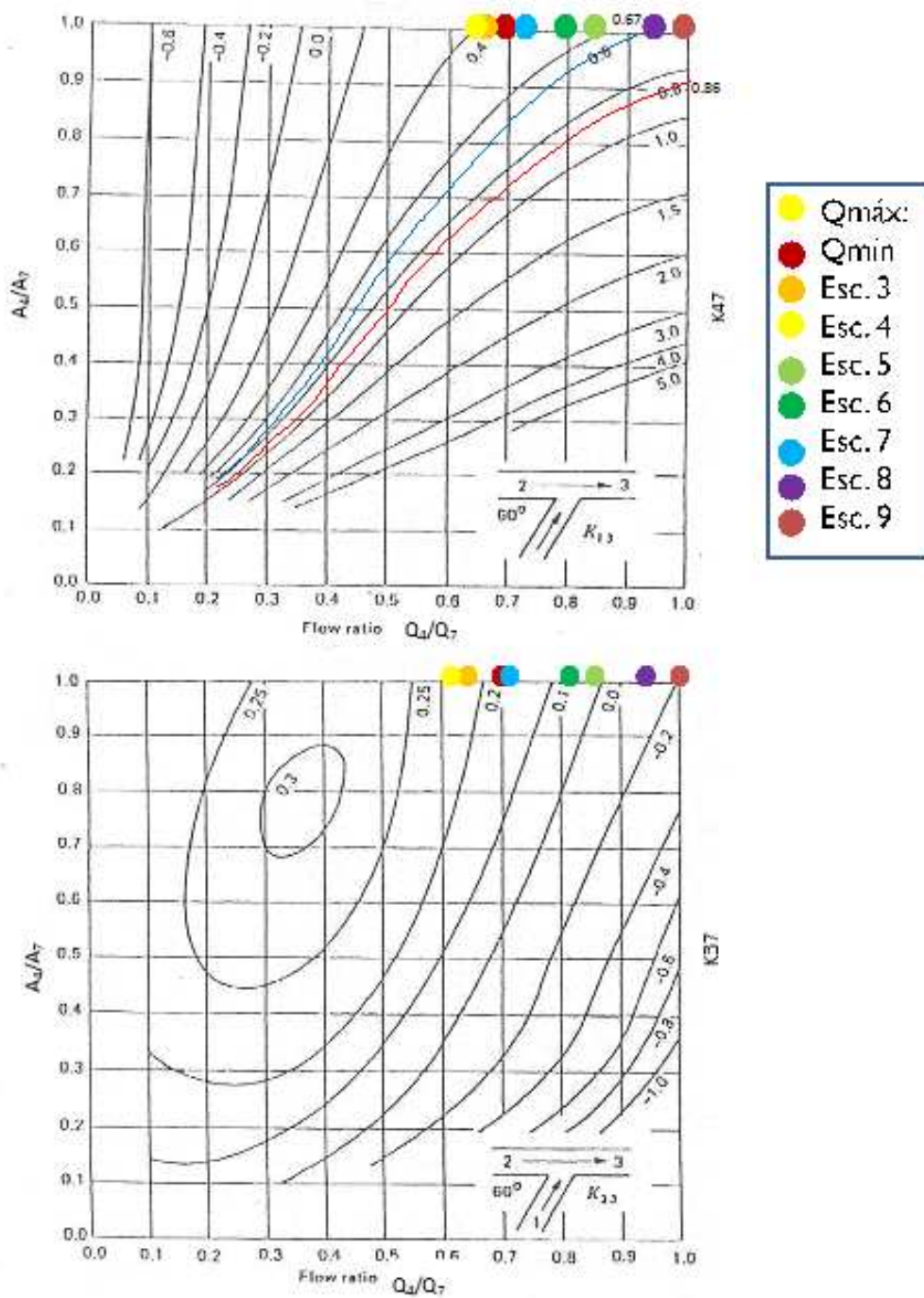
Túnel de descarga Sarapullo, valores experimentales de nueve escenarios.

COMPARACIÓN DE VALORES TEÓRICOS DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN

Miller D.S., "Hydraulic Structures Design Manual"

Ángulo: 45°.

Coficiente K_{47} , Toachi-Galería:

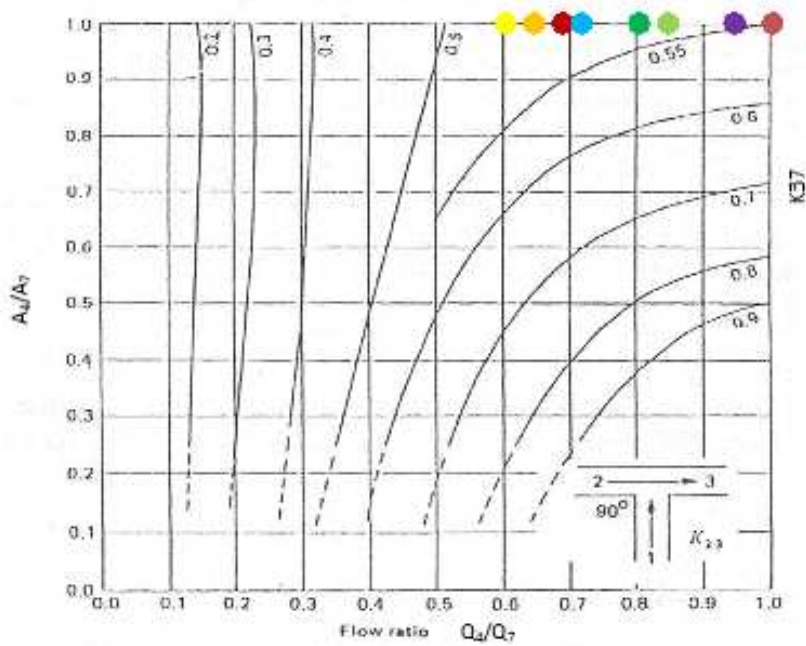
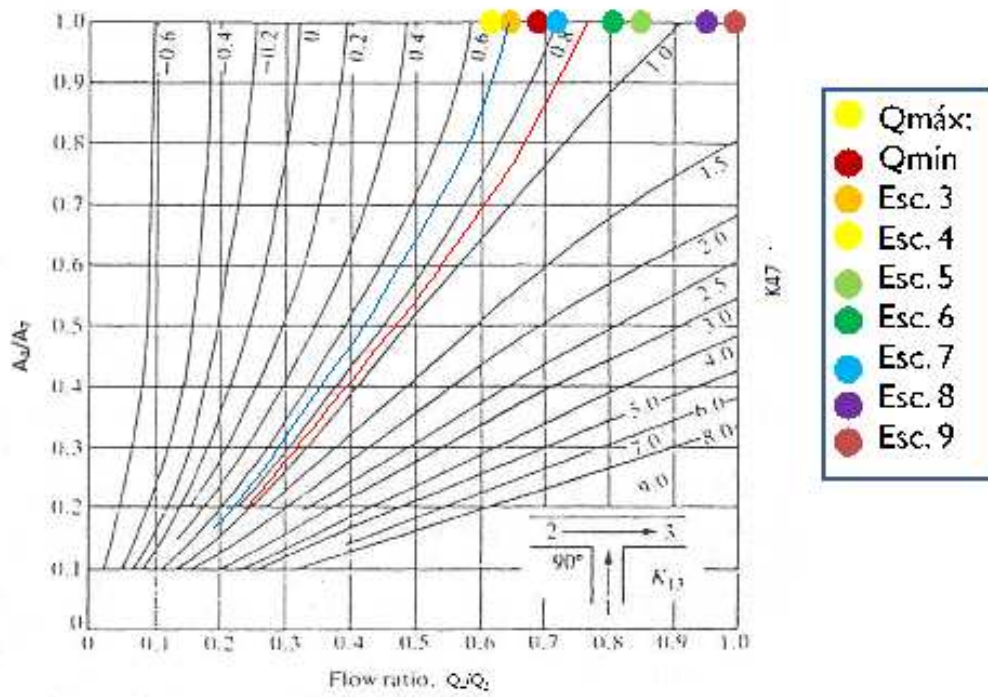


COMPARACIÓN DE VALORES TEÓRICOS DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN

Miller D.S., "Hydraulic Structures Design Manual"

Ángulo: 60°.

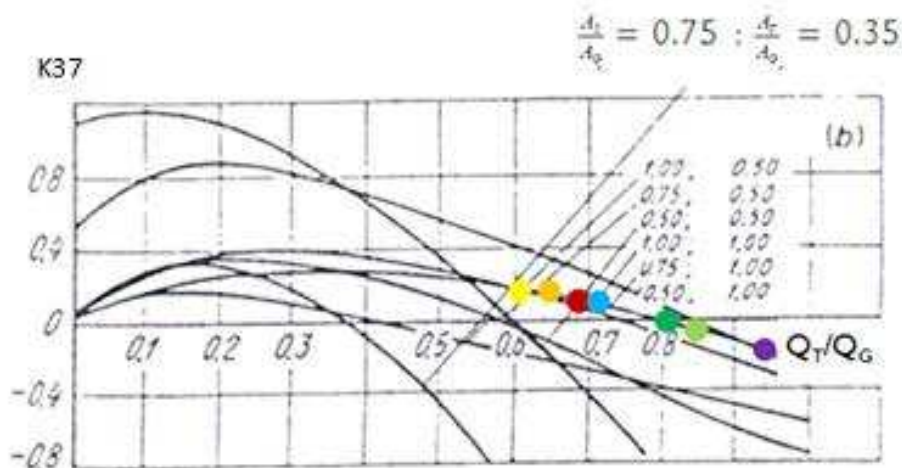
Coefficiente K_{47} , Toachi-Galería y Coeficiente K_{37} , Sarapullo-Galería:



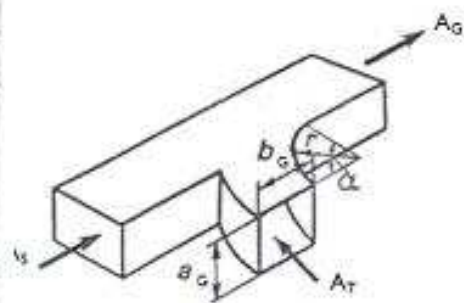
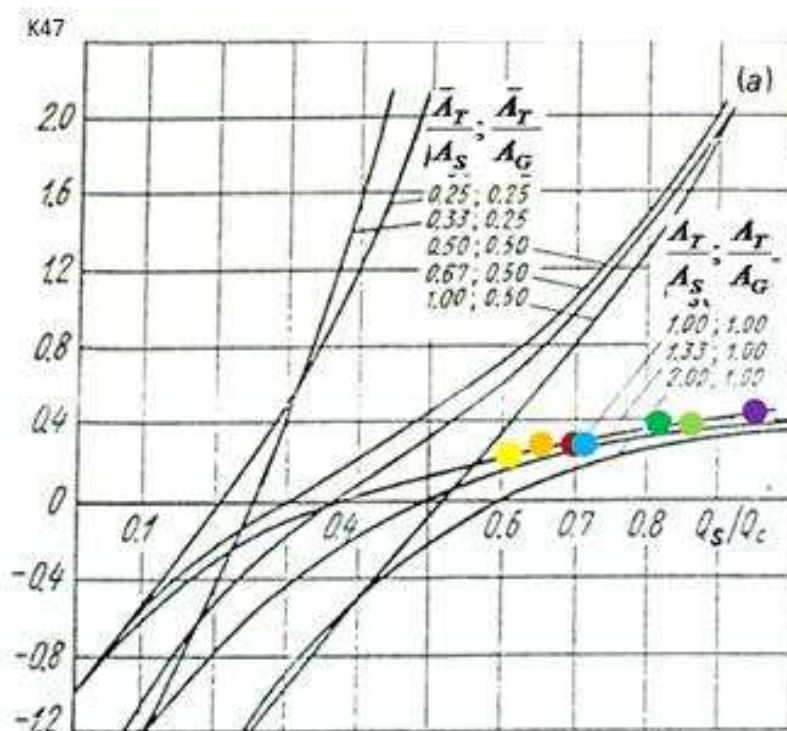
COMPARACIÓN DE VALORES TEÓRICOS DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN

IDELCHIK I.E., "Hand Book of the Hydraulic Resistance"

Coeficiente K_{47} , Toachi-Galería y Coeficiente K_{37} , Sarapullo-Galería:



- Qmáx:
- Qmín
- Esc. 3
- Esc. 4
- Esc. 5
- Esc. 6
- Esc. 7
- Esc. 8
- Esc. 9



ANEXO NO. 3
REGISTRO DE DATOS

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	1
FECHA:	05/10/2011

Escenario:	1	
Apertura de válvula	73	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	8.35	6.87	22.13	39.6
Toachi	9.43	16.58	7.15	35.84	64.1
Descarga		-		57.98	103.7

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	93.7
Piezómetro	1	87.3
	2	86.7
	3	87
	4	86.6
	5	81.9
	6	80.5
	7	79.3
Embalse	Bocatoma	88.4
Sarapullo	Pozo	86.5

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	1
FECHA:	06/10/2011

Escenario:	2	
Apertura de válvula	13	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	3.05	1.57	3.32	5.9
Toachi	9.43	11.48	2.05	7.31	13.1
Descarga		-		10.63	19.0

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	83.8
Piezómetro	1	83.2
	2	83.2
	3	83.2
	4	83.2
	5	83.1
	6	83.05
	7	83.05
Embalse	Bocatoma	81.9
Sarapullo	Pozo	83.1

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	1
FECHA:	07/10/2011

Escenario:	3	
Apertura de válvula	36	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	4.42	2.94	7.44	13.3
Toachi	9.43	12.76	3.33	13.55	24.2
Descarga		-		20.99	37.6

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	92.04
Piezómetro	1	90.3
	2	90.2
	3	90.2
	4	90.15
	5	89.65
	6	89.35
	7	89.25
Embalse	Bocatoma	89.55
Sarapullo	Pozo	89.1

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	1
FECHA:	10/10/2011

Escenario:	4	
Apertura de válvula	57	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	6.55	5.07	14.98	26.8
Toachi	9.43	14.75	5.32	24.60	44.0
Descarga		-		39.59	70.8

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	89.85
Piezómetro	1	86.1
	2	85.8
	3	86
	4	85.9
	5	83.5
	6	82.9
	7	82.5
Embalse	Bocatoma	86.74
Sarapullo	Pozo	85.8

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	1
FECHA:	06/10/2011

Escenario:	5	
Apertura de válvula	33	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	3.05	1.57	3.32	5.9
Toachi	9.43	13.51	4.08	17.55	31.4
Descarga		-		20.87	37.3

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	93.7
Piezómetro	1	92.7
	2	92.7
	3	92.7
	4	92.5
	5	92.1
	6	91.9
	7	91.8
Embalse	Bocatoma	91.81
Sarapullo	Pozo	91.6

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	1
FECHA:	11/10/2011

Escenario:	6	
Apertura de válvula	58	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	4.41	2.93	7.41	13.3
Toachi	9.43	15.98	6.55	32.06	57.4
Descarga		-		39.47	70.6

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	98.05
Piezómetro	1	96.1
	2	96
	3	96.05
	4	95.45
	5	93.55
	6	92.95
	7	92.45
Embalse	Bocatoma	96.43
Sarapullo	Pozo	96.2

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	1
FECHA:	10/10/2011

Escenario:	7	
Apertura de válvula	69	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	6.55	5.07	14.98	26.8
Toachi	9.43	16.59	7.16	35.91	64.2
Descarga		-		50.89	91.0

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	95.86
Piezómetro	1	92.4
	2	92.1
	3	92.3
	4	91.7
	5	88.2
	6	87.3
	7	86.6
Embalse	Bocatoma	94.13
Sarapullo	Pozo	92

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	1
FECHA:	05/10/2011

Escenario:	8	
Apertura de válvula	74	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	3.14	1.66	3.57	6.4
Toachi	9.43	19.43	10	54.94	98.3
Descarga		-		58.51	104.7

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	93.1
Piezómetro	1	91.9
	2	91.9
	3	91.9
	4	89.9
	5	87.4
	6	86.4
	7	85.2
Embalse	Bocatoma	96.87
Sarapullo	Pozo	91.4

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	1
FECHA:	13/10/2011

Escenario:	9	
Apertura de válvula	74	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	1.48	0	0.00	0.0
Toachi	9.43	19.94	10.51	58.53	104.7
Descarga		-		58.53	104.7

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	-
Piezómetro	1	-
	2	-
	3	106.2
	4	104.2
	5	102.5
	6	104.1
	7	101.5
Embalse	Bocatoma	109.4
Sarapullo	Pozo	-

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	2
FECHA:	14/11/2011

Escenario:	1	
Apertura de válvula	74	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	8.44	6.96	22.51	40.3
Toachi	9.43	16.57	7.14	35.78	64.0
Descarga		-		58.29	104.3

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	96.4101
Piezómetro	1	88.7
	2	88.4
	3	88.8
	4	88.5
	5	83.6
	6	84.2
	7	82.4
	8	82.1
	9	81.3
Embalse	Bocatoma	89.07

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	2
FECHA:	15/11/2011

Escenario:	3	
Apertura de válvula	34	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	4.42	2.94	7.44	13.3
Toachi	9.43	12.76	3.33	13.55	24.2
Descarga		-		20.99	37.6

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	90.9464
Piezómetro	1	89.6
	2	89.3
	3	89.4
	4	89.3
	5	88.9
	6	89
	7	88.8
	8	88.8
	9	88.8
Embalse	Bocatoma	88.68

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	2
FECHA:	16/11/2011

Escenario:	4	
Apertura de válvula	57	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	6.53	5.05	14.91	26.7
Toachi	9.43	14.75	5.32	24.60	44.0
Descarga		-		39.51	70.7

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	96.9568
Piezómetro	1	93
	2	92.6
	3	92.8
	4	92.7
	5	90.7
	6	91
	7	90.3
	8	90.15
	9	89.8
Embalse	Bocatoma	92.67

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	2
FECHA:	17/11/2011

Escenario:	6	
Apertura de válvula	57	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	4.42	2.94	7.44	13.3
Toachi	9.43	15.99	6.56	32.12	57.5
Descarga		-		39.56	70.8

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	95.864
Piezómetro	1	93.7
	2	93.5
	3	93.6
	4	93
	5	91.3
	6	91.7
	7	90.7
	8	90.6
	9	90.3
Embalse	Bocatoma	94.07

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	2
FECHA:	16/11/2011

Escenario:	7	
Apertura de válvula	68	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	6.53	5.05	14.91	26.7
Toachi	9.43	16.57	7.14	35.78	64.0
Descarga		-		50.69	90.7

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	92.0392
Piezómetro	1	88.5
	2	88.1
	3	88.3
	4	87.65
	5	84.4
	6	85
	7	83.5
	8	83.35
	9	82.8
Embalse	Bocatoma	90.13

OBSERVACIONES: _____

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
PROYECTO TOACHI - PILATÓN
ESTRUCTURA DE UNIÓN SARAPULLO - ALLURIQUÍN

FASE:	2
FECHA:	17/11/2011

Escenario:	8	
Apertura de válvula	76	%

Limnómetro	Cero	Medida	Carga	Qm (lt/s)	Qp (m³/s)
Sarapullo	1.48	3.05	1.57	3.32	5.9
Toachi	9.43	19.43	10	54.94	98.3
Descarga		-		58.26	104.2

	Pto.	Nivel (cm)
Sarapullo	Tanque	92.0392
Piezómetro	1	90.65
	2	90.55
	3	90.6
	4	88.4
	5	86.2
	6	87.5
	7	85.1
	8	84.9
	9	84
Embalse	Bocatoma	96.25

OBSERVACIONES: _____

ANEXO NO. 4

PLANOS